



Influence de la température sur la phénologie de la canne à sucre : conséquences sur la phase d'implantation de la culture dans les Hauts de La Réunion

Christophe Poser

► To cite this version:

Christophe Poser. Influence de la température sur la phénologie de la canne à sucre : conséquences sur la phase d'implantation de la culture dans les Hauts de La Réunion. Agronomie. Université de la Réunion, 2013. Français. NNT : 2013LARE0030 . tel-01211468

HAL Id: tel-01211468

<https://theses.hal.science/tel-01211468>

Submitted on 5 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA PHÉNOLOGIE DE LA CANNE À SUCRE

*Conséquences sur la phase d'implantation de la culture
dans les Hauts de La Réunion*



Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de La Réunion

par

Christophe POSER

Soutenue le 5 septembre 2013 devant le jury composé de :

M. Jean-Claude Autrey	Ex Directeur du M'SIRI - secrétaire de l'ISSCT (MRU)	Rapporteur
M. Bertrand Ney	UMR EGC - INRA - AgroParisTech (FR)	Rapporteur
M. François-Régis Goebel	URSCA - Cirad (FR)	Examineur
M. Bernard Siegmund	Directeur eRcane (FR)	Examineur
Mme Françoise Ruget	UMR EMMAH - INRA (FR)	Co- Directrice de thèse
M. Gilles Lajoie	DRRT La Réunion - UMR ESPACE-DEV (FR)	Directeur de thèse

« Sapiens nihil affirmat quod non probet »



Le sage n'affirme rien qu'il ne prouve

Devise du Mauritius Sugar Industry Research Institute (M'SIRI)



Figure 1. Le rêve au XIXe siècle d'une canne à sucre géante
Gravure extraite de "History of the vegetable kingdom" Rev. William Rhind, Londres, 1872 coll. J. Barrau. (Barrau, 1988)



Photo 1. XXIème siècle : le rêve d'une canne géante perdue
 XXVIII^{ème} congrès ISSCT, visite de terrain des congressistes lors du pré-congrès du 20 & 21 juin 2013 Sao Paulo - Brazil.
 Source : Site ISSCT

Table des matières

Avant propos	9
Résumé	11
Abstract	13
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SUGARCANE PHENOLOGY	13
<i>Effects on the implementation phase of crops in the highlands of Reunion Island (les Hauts).....</i>	13
Remerciements	15
Introduction générale et problématique	17
Chapitre I : Contexte et état de l’art	19
1. Contexte mondial	19
1.1. Toujours plus de sucre de canne	19
1.2. Autres productions à partir de canne.....	20
1.3. Zones de culture de la canne: usages, extension et limites	21
2. La canne à sucre : généralités	23
3. La Réunion et la canne à sucre	26
3.1. Une île ancrée dans la production de sucre	26
3.2. La canne à sucre : culture pilier de l’agriculture réunionnaise	27
3.3. Une forte pression foncière.....	28
3.4. Les Hauts : une zone de contraintes	29
3.5. Des variétés nouvellement adaptées	37
4. L’implantation de la culture : une étape capitale dans Les Hauts	41
4.1. Des repousses marquées par les conditions d’implantation	41
4.2. Un démarrage plus lent	41
4.3. Les Hauts, un milieu particulièrement stressant.....	44
4.4. La stratégie des planteurs des Hauts à La Réunion	48
4.5. Questions de recherche et démarche expérimentale.....	49
Chapitre II : Aptitude au débourrement - qualité du matériel végétal	55
1. Introduction.....	55
2. Matériel et méthode	56
2.1. Types d’essais et matériel végétal.....	56
2.2. Conditions expérimentales de chaque essai	57
2.3. Variables étudiées	59
2.4. Traitement de données et analyses statistiques.....	60
3. Résultats	61

3.1.	Effectifs de bourgeons en début et fin d'expérimentation	61
3.2.	Longueurs de tiges et nombres de bourgeons : regroupement en quatre classes de topophysie.....	62
3.3.	Effet du raccourcissement de la bouture sur le pourcentage et la durée de débourrement	65
3.4.	Effet de la topophysie du bourgeon sur le pourcentage et la durée de débourrement levée	66
3.5.	Effet de la variété et de la température sur les propriétés de débourrement (proportion, durée, dispersion) de bourgeons issus du milieu de la tige, en conditions de température constante.....	69
3.6.	Effet de la variété et de la température sur la durée de débourrement-levée des bourgeons issus de centre de tige mère	69
3.7.	Evolution de la teneur en sucres selon la topophysie et relation avec les propriétés de débourrement	71
3.8.	Production de racine selon la topophysie, la température, la levée et selon la variété...	71
4.	Discussion	73
4.1.	Sélection des boutures pour les travaux ultérieurs	73
4.2.	Gradient de développement des bourgeons selon leur topophysie.....	74
4.3.	Effets de la température, différences entre variétés	77
4.4.	Conclusion	77
Chapitre III : Débourrement		81
1.	Introduction.....	81
2.	État de l'art.....	81
2.1.	La bouture comme matériel végétal	81
2.2.	Comptabiliser la température	82
3.	Matériel et méthode	83
3.1.	Des variétés contrastées	84
4.	Choix et suivi des températures d'expérimentation.....	86
4.1.	Choix et préparation des boutures.....	89
4.2.	Mesures	89
4.3.	Modélisation du processus de débourrement	92
4.4.	Méthode de Validation.....	95
5.	Résultats & Discussion.....	95
5.1.	Observations.....	95
5.2.	Etablissement d'un modèle de débourrement	97
5.3.	Validation du modèle	102

6. Conclusions.....	117
Chapitre IV : Installation du couvert végétal en année de plantation	121
1. Introduction.....	121
2. Matériel et méthode	122
2.1. Dispositif et mesures	122
2.2. Traitement des données.....	125
3. Résultats	127
3.1. Emission de tiges	127
3.2. Hauteur de tige.....	132
3.3. Emission de feuilles	136
3.4. Fermeture du couvert	141
4. Conclusion	143
Chapitre V : Discussion générale et perspectives.....	149
1. Résultats et limites	149
1.1. Qualité des boutures et débourrement	149
1.2. Débourrement.....	150
1.3. Autres processus post débourrement.....	151
2. Possibles valorisation géographique des résultats	152
2.1. Détermination de zone potentielle de culture.....	152
2.2. Définition de critères pour délimiter des zones de culture	152
2.3. Climat.....	153
2.4. Zonage et période d'étude	153
2.5. Méthode de calcul.....	154
2.6. Résultats	156
Perspective de recherche	159
Références bibliographiques	161
Liste des Figures	171
Liste des tableaux	175
Liste des Photographies	176
Annexes	177
1. Levées prédites et observées par variétés et par essais	178
2. Exp5. Températures de l'air et du sol.....	186
3. Paramètres du modèle.....	187

Avant propos

Au fil de ma carrière j'ai eu la chance de pratiquer plusieurs métiers, tous liés à la culture de la canne, entre Recherche et Développement sous différentes latitudes, contextes géographiques, humains et politiques en abordant différents thèmes tels que :

- *La mécanisation de la plantation (Maurice)*
- *L'introduction de nouvelles variétés sur de nouveaux sites (Vietnam)*
- *La restructuration du solde bananeraies par la rotation à base de cannes (Guadeloupe)*
- *L'adaptation à des contraintes liées à la culture dans les Hauts (La Réunion)*

Ces expériences m'ont fourni un regard ouvert sur cette formidable plante qu'est la canne à sucre.

Le fil conducteur de mon parcours professionnel est donc cette plante, championne du monde de production de biomasse dont M Henry-Hervé Bichat¹ dit que c'est « la plante la plus épatante de toutes celles qu'il a eu l'occasion de connaître », il ajoute « Dieu a créé la canne pour La Réunion ». Par ces qualités à fixer le gaz carbonique, à produire de la matière organique, son volumineux système racinaire, sa souplesse face aux cyclones : c'est une plante miracle. Machine performante pour produire glucides, cellulose, la canne constituera une des sources d'approvisionnement majeure en matière première dont 20% devrait provenir de l'agriculture ou de la Forêt en 2020. Le Pr Daniel Thomas² annonce quant à lui qu'« il faudrait l'inventer si elle n'existait pas ».

Au travers des différents travaux sur la plante j'ai ressenti l'importance cruciale que représente la phase de mise en place de la culture. Le succès de la plantation repose sur le choix d'un matériel sain et adapté à l'environnement de culture. C'est cette double condition qui permet, selon moi à la plante de s'adapter, qui induit un niveau de production satisfaisant et par conséquent l'adoption de la variété par le planteur.

La plantation est une course ! Course sur l'autonomie de la bouture qui va puiser sur ses propres réserves, pour mettre en place son système racinaire et installer son système aérien au détriment des plantes en concurrence.

*Sur nos travaux de recherche des causes d'une levée erratique en plantation mécanisée, nos protocoles reposaient sur la préparation de sol, la densité de boutures, la qualité de répartition du traitement fongique. Cependant, ils sous estimaient l'importance de la qualité germinative intrinsèque de la variété, l'âge physiologique, la partie de tige mère utilisée, l'état sanitaire (attaque par les insectes, notamment les foreurs de tige comme *Chilo sacchariphagus*, ou encore *Sesamia**

¹ Henry-Hervé Blichat est Ingénieur général honoraire du Genie Rural des Eaux et Forêts, fondateur et directeur général du GERDAT devenu Cirad et directeur général de l'Institut national de recherche agronomique (INRA).

² Pr Daniel Thomas est professeur à l'université de Technologie de Compiègne, Directeur d'Etude à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris, Membre de l'Académie des Technologies, Président de l'Agence Régionale d'Innovation Picardie et a été de 2005 à 2008 1er Vice-Président du pôle de compétitivité « IAR » (l'un des Fondateurs du Pôle IAR). Il jouit d'une renommée mondiale dans les domaines des biotechnologies.

calamistis ...) ou encore les dégâts physiques sur les bourgeons et boutures occasionnés lors de la préparation, de la coupe et des transbordements ...

Aux Antilles tout comme au Vietnam les conditions de mise en place de la culture sur lesquelles j'ai travaillé étaient très favorables à l'implantation de la culture. Les conditions climatiques de Basse terre de La Guadeloupe tout comme celles du Delta du Mekong au Vietnam (drainée lors de la saison des pluies et irriguée en saison sèche) étaient favorables tant au niveau des températures que de l'humidité. La qualité du matériel végétal et le soin apporté par les planteurs étaient au rendez-vous.

A La Réunion, sur thème de la canne à sucre des Hauts, j'ai poursuivi les travaux entrepris par Denis Pouzet sur le resserrement de l'espacement entre les lignes et l'allongement des cycles de récolte. De nombreux essais en conditions réelles, mis en place chez des planteurs se sont avérés difficiles à interpréter. Riches en enseignements et ayant permis de transférer des conseils à la filière, il nous a alors paru pertinent d'orienter nos travaux vers la problématique présentée dans ce travail de thèse.

Dans un milieu contraint comme celui des Hauts de La Réunion, des essais sur l'utilisation de mulch naturels (paille, compost de déchets verts) ou artificiel (matière plastique « biodégradable ») m'ont interpellés sur l'importance d'une modification de la température, si minime soit-elle, au voisinage de la bouture. Ainsi le fait d'abaisser ou d'augmenter de quelques degrés la température du sol avait une importance considérable sur la dynamique de levée et la mise en place du couvert végétal subséquent. L'utilisation dans un même temps de clones du centre eRcane, non encore diffusés, m'a fait prendre conscience de la capacité de ses futures variétés à mieux fonctionner, à priori, en condition de température basse que les variétés traditionnelles.

Le sujet était là ...

Les dernières variétés testées durant la période d'analyse et de rédaction de ce travail sont encore plus prometteuses. Puisse ce travail permettre de les valoriser dès leur mise à disposition aux planteurs en 2013.

Résumé

Cette étude s'intéresse aux effets de la température sur le développement de la canne à sucre et le potentiel d'expansion de cette culture au sein de nouvelles zones géographiques. En particulier, elle vise à caractériser les stades de développement de la plante durant lesquels les basses températures agissent afin d'extrapoler des zones géographiques d'adaptation.

Un travail plus particulier est engagé sur l'effet des basses températures en condition d'altitude tropicales dans Les Hauts de La Réunion. L'implantation en cycle de plantation est identifiée comme une étape très importante pour les cultures de canne, et pour la culture dans les Hauts en particulier, car elle conditionne non seulement la date de première récolte et son niveau mais elle a un impact sur le cycle de repousse. Les expérimentations ont lieu à la fois en milieu contrôlé (chambre climatique et serre) et en conditions réelles (champs à différentes altitudes).

Une étude méthodologique sur la qualité du matériel végétal est réalisée pour valider les conditions d'expérimentation. Cette étude montre que des expérimentations de débourrement de bourgeons peuvent être réalisées avec des boutures d'un seul bourgeon, de taille réduite. Les comparaisons de débourrement à différentes températures nécessitent d'utiliser des boutures triées, saines, et homogènes, c'est-à-dire provenant de la partie médiane de la tige-mère. Les bourgeons de la partie supérieure (entrenœuds non consolidés à croissance non terminée) et ceux issus de la base de la plante devront être écartés.

L'influence de la température est quantifiée sur différentes variétés lors de la phase de débourrement-levée, puis au cours des stades de développement suivants jusqu'à la fermeture du couvert végétal. La température influence considérablement sur le processus de débourrement. Le modèle thermique élaboré, bien que limité à une gamme de températures, prédit de façon satisfaisante la levée à température constante et permet de quantifier les différences variétales observées.

Les expérimentations au champ révèlent des différences dans les dynamiques d'émission et de croissance des tiges et de mise en place de la surface foliaire, non seulement entre sites d'altitude différente mais aussi entre variétés. La température joue un rôle majeur dans cette différenciation. De plus, selon le processus étudié, le classement des variétés suivant leurs performances n'est pas strictement identique d'un site à l'autre. Ce constat révèle l'intérêt d'approfondir l'étude sur la période d'installation du feuillage en conditions climatiques variées.

Le modèle de débourrement-levée développé au cours de cette étude a permis d'identifier des indicateurs pour évaluer la capacité d'adaptation de différentes variétés de canne à sucre. Associés à une base de données météorologique géolocalisée, ces derniers mettent en évidence l'importance de la température seuil dans la capacité d'adaptation des variétés à différentes zones géographiques.

Les méthodes et outils élaborés au cours de cette thèse ont d'ores et déjà des retombées pour accompagner les outils traditionnels de sélection variétale à La Réunion et sont extrapolables dans des zones à températures plus fraîches. Ces retombées pourraient s'accroître avec la mise au point de nouveaux itinéraires techniques. Enfin, la poursuite des travaux cartographiques, comme outils d'étude du potentiel d'implantation des cultures dans les Hauts, constitue également un axe prometteur pour la valorisation des acquis de cette thèse.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SUGARCANE PHENOLOGY

Effects on the implementation phase of crops in the highlands of Reunion Island (les Hauts)

This thesis is centered on the effects of temperature on sugarcane development and its potential for geographical expansion under low temperatures in high-altitude tropical conditions. In the highlands of Reunion Island (les Hauts), the duration of the germination, in planting years, affects the date and the level of the first harvest, as well as the sugarcane yield in the following ratoon crop cycle.

Trials took place in climate chambers, greenhouses and fields at different temperatures and altitudes. A preliminary study validates the conditions governing the experimentation: bud bursts can be studied through single, healthy, single bud cuttings that are taken from the middle section of the mature stem.

Temperature considerably influences the primary tiller germination and emergence stages. The thermal model that was developed satisfactorily predicts bursting at a constant temperature and allows for the quantification of observed varietal differences. Field trials reveal a disparity in the production and growth dynamics of leaves and stems according to locations and varieties. Temperature influences this differentiation.

Among the indicators that were elaborated, the duration for the seedling of half the population, when applied to a climatic database, allows one to define geographical zones and time periods conducive to the introduction of sugarcane according to its variety. The methods presented herein can be used in varietal selection for all zones where cold temperature limits the spread of crops. Results could be used for the development of new cultural practices or for further studies in geo-referenced agronomic zoning.

Key words: sugarcane, cuttings, topophysis, burst, temperature, temperature threshold, development model, spatialization

Remerciements

« Regarde les données de base ... » F. Ruget

En tout premier lieu, je souhaite remercier vivement Gilles Lajoie, Directeur Régional de la Recherche et de la Technologie à La Réunion, qui a accepté de diriger ma thèse ; il a su me conseiller et me soutenir. J'en profite pour exprimer ma reconnaissance à L'Université de La Réunion et son Ecole doctorale, au BRED pour leur accueil.

J'exprime ma profonde gratitude à Françoise Ruget, co-directrice de cette thèse, pour l'encadrement scientifique rigoureux de tous les instants, et son investissement sans faille, son tact et sa patience... jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Je la remercie ainsi que son mari Dominique Flament pour leur chaleureuse hospitalité durant ces multiples séjours en Avignon. Merci au personnel de l'UMR EMMAH pour leur accueil au Domaine Saint-Paul de l'INRA.

Je souhaite remercier messieurs Jean-Claude Autrey, Secrétaire Général de l'International Society of Sugarcane Technologists (ISSCT) et Bertand Ney, Président du département Sciences et Ingénierie Agronomiques, forestières, de l'Eau et de l'Environnement pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter d'être rapporteurs de ce travail de thèse.

Je remercie vivement Bernard Siegmund, qui m'a fait le plaisir d'accepter d'être membre du jury de ma thèse et encouragé à faire ce travail. Merci à eRcane, centre qu'il dirige pour la mise à disposition de variétés. Une pensée pour les anciens qui ont contribué à sa renommée actuelle et que j'ai eu l'occasion de côtoyer et d'apprécier : Mike Hellmann pour notre belle aventure au Vietnam, Jacques Payet sélectionneur et aux collègues actuels : Laurent Barau, Audrey Thong Chane, Jacques Bernard, Fabrice Poiny, Thomas Dumont, Thomas Labrunie pour leur collaboration.

J'adresse un grand merci à François-Régis Goebel pour avoir accepté de rejoindre mon comité de thèse et de participer au jury. Ses conseils avisés et son soutien sans faille ont été de précieux atouts pour mener ce travail à son terme. Grand merci à Edward Gérarddeaux qui a lui aussi accepté de rejoindre le comité de thèse et dont les conseils sur la rédaction ont été précieux. Je tiens à remercier Gilles Poser pour la qualité de ces relectures fraternelles autant qu'avisées.

Un grand merci plein de respect à Alain Capillon pour sa bienveillance et ses encouragements lors des comités de thèse. Il m'a donné confiance pour que je reste aussi « opiniâtre » qu'il l'avait décelé lors de nos premières rencontres.

J'adresse aussi mes remerciements aux Directions successives du Département Persyst : Robert Habib qui m'a fait confiance dès le départ et François Côte qui m'a réaffirmé son soutien à un moment crucial où les doutes auraient pu venir.

Merci à Florent Maraux, Directeur de l'URSCA qui m'a mis le pied à l'étrier dans cette démarche, je lui suis très reconnaissant de m'avoir mis en relation avec Françoise Ruget ; merci à Bruno Bachelier mon animateur d'équipe qui m'a accompagné et appris le « retro-planning ».

Je souhaite afficher ma très sincère et reconnaissance à Gilles Mandret, Directeur Régional Réunion Mayotte du Cirad, pour son très précieux soutien dans ma démarche.

Sans données il n'y aurait pas eu d'analyses possibles. Je souhaite remercier les techniciens et collaborateurs suivants pour leur aide : Maurice Gueno qui a servi de chef d'orchestre « en chambres » pour nos travaux et a su se débrouiller parfois seul ; toute « l'équipe canne » : Michel Jeannette, Lilian Gauvin, Patrice Leblé, Alix Rassaby, Gino Gauvin, Emanuel Hoareau et Jean Jo Ester, les stagiaires successifs sur le thème des Hauts dont je veux saluer le travail : Stéphanie Roguet, Benoit Vivet, Frédéric Palamara et Thibault Nordey auquel je souhaite un « fructueux » travail de thèse ; enfin Marion Lecaille pour sa collaboration sur la réalisation des cartes. Merci à Patrick Legier et son équipe du laboratoire des sols du Cirad de La Bretagne. Merci à Frédéric Payet du CTICS et tous ceux qui contribuent à l'acquisition des données de plantation : DAAF, Pôles Canne, Syndicat du Sucre.

Je tiens à remercier tout le personnel du Cirad de La Réunion : Catherine Ango, Josie Carpanin, Nadège Nanguet, Marie Andrée Dumay. Merci à l'ensemble du personnel administratif et d'entretien, qui, dans l'ombre, fait en sorte que fonctionne notre belle maison Cirad à La Réunion.

Une pensée et des remerciements amicaux à Hubert Manichon qui m'a soutenu pour mon DEA (au péril de sa vie dans les tranchées des profils culturels sous le passage des avions épandeurs...), à Claude Vuillaume pour m'avoir offert le précieux livre de Van Dillewijn.

Je souhaite remercier Sylvain Perret qui m'a aidé à m'orienter pour arriver à ce sujet, à Pierre-François Chabalière qui m'a soufflé l'idée d'utiliser les chambres climatiques de la station de La Bretagne, Denis Pouzet pour la transmission de son approche et ses réflexions sur les Hauts de La Réunion. Je tiens à remercier messieurs Raymond Bonhomme, Marco Woperes et Bernard Vercambre pour leurs précieux conseils lors de l'établissement du sujet.

Je souhaite remercier Bernard Reynaud, Directeur de l'UMR PVBMT pour m'avoir ouvert les portes du Pôle de Protection des Plantes et surtout autorisé à travailler en statistique avec Frédéric Chiroleu et ses « Chirolettes » : Claire Bissery, Sylvaine Jégo, Claire Dufourd, Charlotte Giraud-Carrier, et plus récemment avec Sandrine Le Squin que je remercie spécialement et j'adresse un salut tout particulier à Aurore Benneveau pour son accompagnement ; Annie Boyer pour la formation sous EndNote.

Merci à Xavier Augusseau et à Camille Demené mes voisins géographes pour leur soutien avisé. J'adresse toute ma reconnaissance et mes remerciements à Cécile Fauvet-Rabot, Damien Sabatier et Laetitia Albini pour leur précieuse aide ainsi que Valentine Lebourgeois et Caroline Lejars pour m'avoir montré le chemin.

Une reconnaissance toute particulière et affectueuse à mes proches collègues. Jean-François Martiné s'est rendu disponible tout au long du travail pour répondre à mes interrogations, m'aider dans mes réflexions, faire de subtiles propositions. Avec José Martin ils ont assurés en bons « compadres » un soutien infaillible et ces désormais rituels moments de « choc à 80% », merci à Daniel Marion pour son fidèle soutien discret, solide.

Des pensées pleines d'affection pour ma mère, mes frères (dont Gilles pour ses relectures), ma sœur, à mon père qui cultivait quelques pieds de canne à sucre en région parisienne ...

Enfin, à Aliette et nos enfants : Morgane et Marc à qui j'ai imposé mes absences, mes présences absentes, mes humeurs, qui ont dû les supporter et qui m'ont tant supporté ...

Je leur dédie ce travail.

Introduction générale et problématique

La consommation mondiale de sucre est en augmentation depuis 1960. La part relative de production de sucre à partir de canne au regard d'autres plantes saccharifères ne cesse d'augmenter pour passer de 2/3 à 3/4 entre 2000 et 2010 (F.O.Light, 2011). Les valorisations de la production autres que le sucre sont également en augmentation notamment les produits énergétiques se substituant aux sources d'origines fossiles (bioéthanol, biogaz) ou autres (pharmaceutique, biomolécule, matériaux bio-sourcés ...) de mieux en mieux rémunérés. Les surfaces sous culture sont par conséquent en extension et s'étendent maintenant vers des milieux divers et parfois sous contraintes. À La Réunion, mais également en Argentine, au Mexique, en Inde ainsi qu'en Afrique du Sud, une partie des surfaces sous culture de canne sont situées en altitude. Les variétés obtenues à l'issue d'une sélection longue et coûteuse doivent être adaptées aux contraintes qu'imposent généralement les zones situées en altitude et plus particulièrement soumises à des températures plus faibles.

Dans ces milieux, la phase d'implantation d'une nouvelle culture, ou le démarrage d'une repousse est la première étape du cycle et par conséquent elle est déterminante. La culture, installée pour plusieurs cycles de récolte (5 à 15, parfois 20) se trouve en compétition avec des adventices qui se sont adaptées naturellement dans le temps à cet environnement d'altitude. Leur présence est d'autant plus confortable qu'elles sont confrontées à des variétés de canne à sucre non spécifiquement sélectionnées pour ces environnements. La concurrence s'exerce sous la forme d'une stratégie de conquête de l'espace particulièrement efficace dès la plantation de la canne à sucre.

Des variétés récemment créées à La Réunion, destinées aux terrains d'altitude, affichent chez les planteurs des rendements bien supérieurs aux variétés cultivées antérieurement. Elles produisent plus de biomasse et aussi plus de sucre par unité de surface (Poser et al., 2012).

Pour comprendre l'origine de l'adaptation des nouvelles variétés aux conditions plus froides, il est nécessaire d'étudier les phénomènes de développement de la plante, regroupés sous le terme phénologie, qui signifie : "étude de l'apparition" (des organes). La réponse à l'adaptation de certaines variétés aux conditions des Hauts de La Réunion passe ainsi par la caractérisation de l'apparition des différents organes au cours de cycles de cultures consécutifs (plantation et repousses).

La thèse est restreinte à la phase d'installation du couvert végétal pour un cycle de culture en plantation. Les stades étudiés se situent entre la plantation des boutures et par convention à la période où le couvert est complètement couvrant, c'est-à-dire où il intercepte une très forte proportion du rayonnement incident. Nous supposons que l'adaptation variétale aux contraintes liées à l'altitude s'exprimera dans tout ou partie des processus compris dans ces stades. Afin d'approcher les qualités intrinsèques des variétés de canne, nous nous sommes délibérément affranchis de toute condition limitante en eau et en nutriments qui parasiterait notre étude.

Dans ces conditions, la thèse s'intéresse au début de cycle, donc à la période où la température est considérée comme le principal facteur limitant pour les processus en présence durant cette phase. Le rayonnement et les facteurs trophiques associés n'interviennent de façon certaine qu'à la fin de la période étudiée notamment à travers les quantités d'assimilats disponibles pour la croissance.

Ainsi l'étude porte successivement sur :

- la qualité du matériel de plantation, sa capacité à lever selon l'état sanitaire des boutures, à la position du bourgeon le long de la tige (Topophysie) ;
- la dynamique de levée de variétés adaptées ou non aux zones d'altitude en condition de température constante (Chambre climatique) ;
- la dynamique de levée de variétés adaptées ou non aux zones d'altitude en condition de culture au champ depuis la levée jusqu'à la fermeture du couvert. Les différents processus tels que débourrement-levée, émission de tiges, de talles seront caractérisés en fonction de la température ;
- la possibilité de valoriser par des cartes les résultats obtenus par des simulations par zone climatiques principalement altitudinale (température), sous forme de carte.

La Réunion représente un terrain d'expérimentation privilégié (Martiné et al., 1999) pour l'étude de l'implantation des cannes en condition d'altitude. L'île, de par ses reliefs variés et son histoire géologique, présente une large gamme de conditions de climats³ et de sols. La Réunion constitue, en ce sens un véritable laboratoire naturel permettant d'appréhender les clefs de l'adaptation d'une variété aux conditions qui prévalent dans les zones de cultures tropicales d'altitude (Pouzet, 2011) .

Le changement climatique qui s'est opéré au cours des 10 dernières années à La Réunion a conduit à un réchauffement de 0,15°C (Jumaux et al., 2011) qui repousse les limites altitudinales jusqu'alors imposées par des températures trop fraîches. Par ailleurs, l'évolution des pratiques culturales vers une approche plus intégrée comme l'utilisation de paillis, l'incorporation de matières recyclées (déchets vert, vinasses, composts...), la valorisation de l'espace interligne pourrait modifier les conditions environnementales à l'échelle de la parcelle et particulièrement les conditions de températures au voisinage des boutures au cours de la phase étudiée.

L'étude de l'effet de la température sur la phase de mise en place de la culture de canne devient alors un sujet pertinent tant sur le plan local que du point de vue de la connaissance qu'elle peut apporter et qui pourra être extrapolée à d'autres régions où la culture de la canne est en extension.

Notre travail traitera des questions suivantes :

Quelle est l'influence des températures tropicales d'altitude, donc fraîches, sur la culture de la canne à sucre ?

Les températures fraîches pénalisent-elles uniformément tous les processus physiologiques mis en jeu lors de l'implantation de la culture ?

Les résultats obtenus lors d'études phénologiques sont-ils exploitables géographiquement pour évaluer les potentiels de culture de canne à sucre sur une région comme celle des Hauts de La Réunion ?

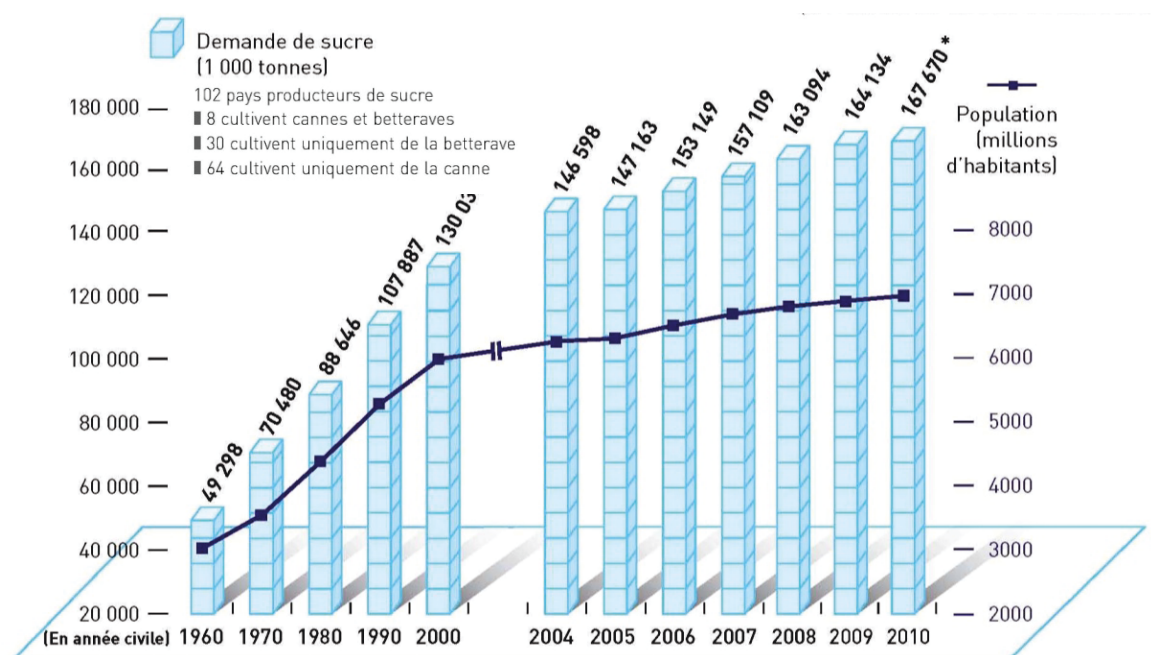
³ De nombreuses données météorologiques sont accessibles

Chapitre I : Contexte et état de l'art

1. Contexte mondial

1.1. Toujours plus de sucre de canne

La demande mondiale annuelle de sucre se situe autour de 168 millions de tonnes, elle progresse à un taux relativement stable aussi bien par dizaine d'années depuis 1960 (entre 30% et 40 %) que par an (2.3 % en moyenne) sur les 6 dernières années (Figure 2). Cette augmentation résulte de la croissance démographique d'une part et d'autre part de l'augmentation de la consommation par habitant notamment dans les pays d'Asie.



*estimation (en millier de tonnes de sucre brut)

(Attention au changement d'échelle des années après 2000)- Source : F.O. Light 2011

Figure 2. Demande de sucre dans le monde en regard à la croissance démographique mondiale

La part relative de sucre produite à partir de canne à sucre n'a cessé de croître vis-à-vis de celle produite à partir de betterave. Elle représente désormais 80 % de la production mondiale contre 74% en 2005 (Figure 3). En 2010, cette production de saccharose représente 133 Mt produites sur 20 millions d'hectares (F.O.Light, 2011).

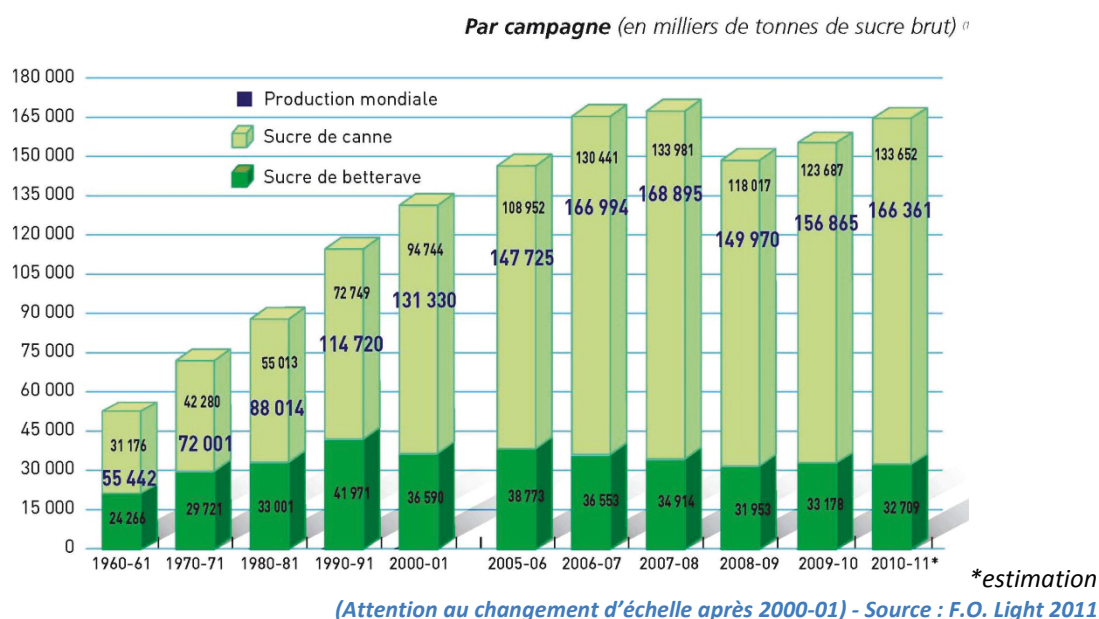


Figure 3. Evolution de la production sucrière mondiale et des parts respectives canne à sucre / Betterave

La culture de canne ne cesse donc de s'étendre dans les pays tropicaux, elle se cultive aussi de plus en plus dans des environnements contraignants (sols pollués, sols pauvres...), en pente forte, en altitude...

1.2. Autres productions à partir de canne

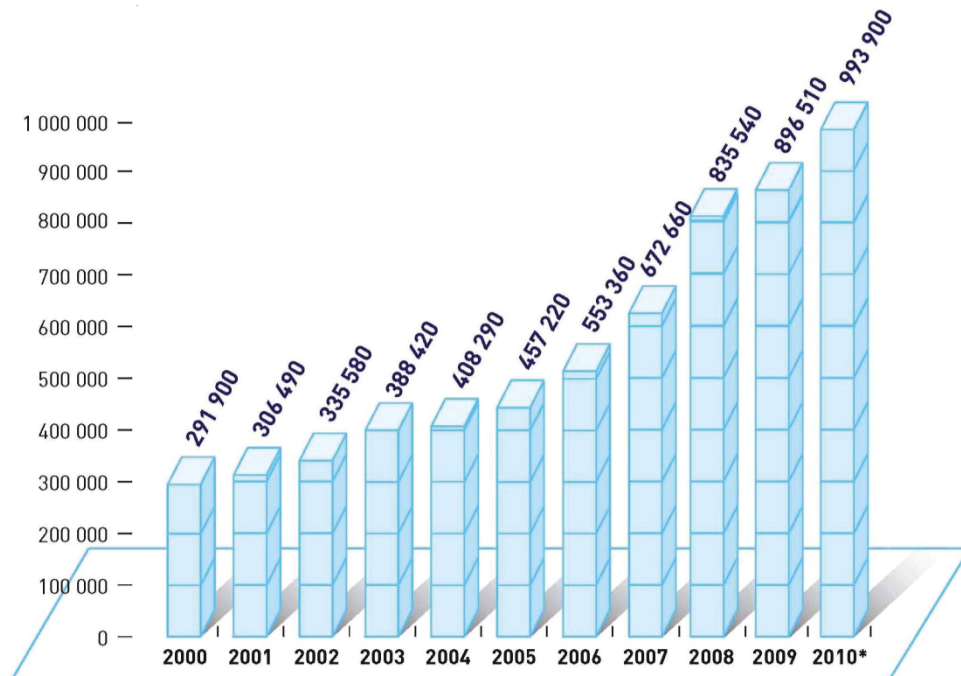
La canne est de plus en plus cultivée du fait de ses multiples ressources et des demandes respectives en augmentation. Historiquement la canne était principalement destinée à produire le sucre et le rhum. D'autres marchés se sont ouverts et sont en croissance : l'énergie et les carburants, la chimie, les bioplastiques, la construction, le papier, le fourrage et les compléments alimentaires pour le bétail.

Avec une production aérienne de 15 à 20 t de MS/ha /an⁴ et un équivalent énergétique de 400 à 500 GJ/ha/an la canne se situe en tête des plantes susceptibles de produire des biocarburants comme l'éthanol (Directorate General for Research and Innovation, 2005). L'éthanol provient principalement de la canne à sucre ou du maïs, accessoirement de la betterave, du sorgho ou du manioc.

La production d'éthanol est en pleine expansion, elle augmente de 2/3 de 2000 à 2007 (Zuurbier and van de Vooren, 2008) avec une croissance vertigineuse depuis 2005 (Figure 4) selon les chiffres de F.O. Light (2011). L'augmentation de sa production est principalement due à l'augmentation de la production de bioéthanol. Le bioéthanol est produit à partir du sucre ou du jus sucré extrait de la plante à partir de la canne entière ou de la betterave, il est utilisé comme carburant dans certains pays. Le Brésil, premier producteur de canne à sucre, régule depuis le choc pétrolier de 1974 sa production de sucre ou d'éthanol (bioéthanol) selon les cours du marché mondial.

⁴ Tonne de matière sèche (MS) par hectare et par an

La bagasse (résidu de broyage des tiges de canne) est brûlée et produit de l'énergie électrique. Le furfural (obtenu à partir de la cellulose des tiges) est une molécule très demandée par l'industrie chimique (résines, plastiques, herbicides, acides, ...). Le saccharose de la canne à sucre est utilisé pour la fabrication de bioplastique.



*estimations - Sources F.O. Licht

Figure 4. Evolution de la production d'alcool (éthanol) dans le monde (en milliers d'hectolitres)

Toutes ces utilisations possibles et ces demandes croissantes laissent entrevoir la poursuite de l'extension de la culture de la canne à sucre sur de nouveaux terrains. On parle de plus en plus d'une canne multi usages avec des fonctions environnementales intéressantes (services écologiques, antiérosif, aération des sols...)

1.3. Zones de culture de la canne: usages, extension et limites

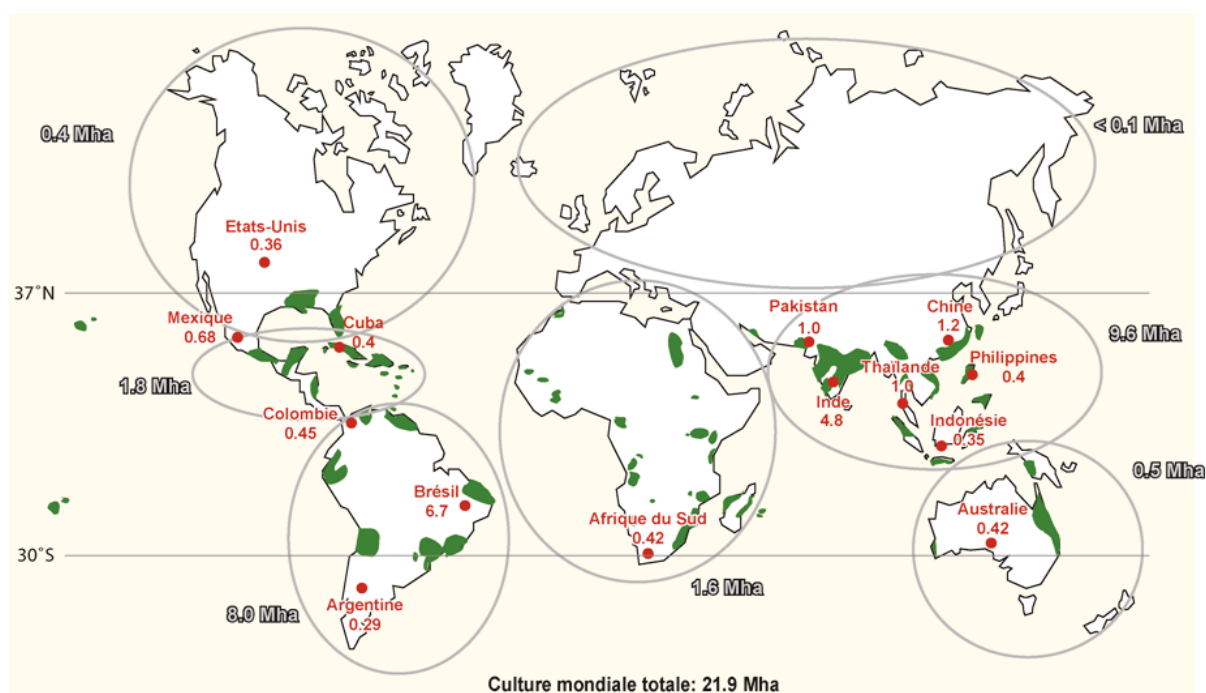
Pour satisfaire le marché du sucre européen dans les années 60, des complexes sucriers se sont installés sur les terres fertiles, sur le continent africain à proximité des fleuves pour l'accès à l'eau indispensable pour le refroidissement des usines par l'eau et faciliter éventuellement l'irrigation des cultures en cas de déficit hydrique. Pour les autres situations et dans la majorité des cas, la canne à sucre était développée sur des terrains adaptés qui offraient un climat propice et des conditions favorables à sa culture. Aujourd'hui, les logiques d'implantation de la culture de canne à sucre ne sont plus les mêmes. La concurrence grandissante dans l'utilisation des terres à des fins alimentaire ou énergétique (développement des biocarburants) modifie la répartition des usages (Rainelli, 2007). La canne a une position particulière dans cette concurrence car elle peut être considérée comme une culture alimentaire lorsque le sucre est produit et comme une culture énergétique lorsque le sucre est valorisé en alcool (éthanol) ou bien lorsque la bagasse est utilisée pour produire vapeur et électricité (principe de la cogénération).

1.3.1. Zones de culture : augmentation de la production

Le Brésil est le plus gros pays producteur, seul en tête avec 34% des 20 Millions d'hectares plantés en canne à sucre (Cuadra et al., 2012). Il absorbe d'ailleurs à lui seul 75 % de l'accroissement mondial des terres sous cultures de canne durant la période 2000 à 2007, les surfaces nouvelles de canne ont été plantées sur des terres ayant eu principalement des usages pastoraux ou agricoles, 45% et 50% respectivement pour l'année 2007 (Zuurbier and van de Vooren, 2008).

1.3.2. Zones de cultures : contraintes / limites

La canne à sucre est réputée pour supporter des terrains difficiles. Cette culture tolère relativement bien les contraintes telluriques comme l'acidité (Fauconnier and Bassereau, 1970), les toxicités aluminiques (Pouzet, 2011) ou encore la salinité (Ezaki et al., 2008). Elle peut être cultivée sur des terrains pauvres en matières organiques, convient au terrain caillouteux et même peu profonds grâce à un puissant système racinaire (Chopart, 2004). Tolérante aux contraintes pédologiques, elle est plus exigeante pour ses besoins en eau qui oscillent entre 1500 à 2500 mm par cycle de récolte (Brouwer and Heibloem, 1986). Fauconnier et Bassereau (1970) fournissent les limites de culture du 37° parallèle de latitude Nord et le 30° parallèle de latitude Sud (Figure 5) en raison du froid et de l'altitude. Les parties tendres et aqueuses (feuilles et jeunes bourgeons) sont sensibles au gel. Fauconnier (1984) précise que l'exposition à 0 °C ou à -1 °C durant une seule minute est létale pour la plante.



En Millions d'hectares

Sources Cedus – FAOSTAT 2008 – Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 5. Distribution géographique de la production mondiale de sucre

Dans un contexte de dérèglement climatique, Lobell (2008) simule à l'aide de modèles de culture l'impact de l'augmentation de température (0,5°C à 2°C) couplé à des modifications de la pluviométrie (plus ou moins 20%). Il observe les modifications de la distribution des zones de culture projetées en 2030. Dans cette étude, la baisse de production est de l'ordre de quelques pourcent pour le Proche-Orient et le Moyen-Orient ainsi que pour l'Afrique de l'Est et de près de 5% pour

l'Afrique du Sud. À contrario, l'augmentation de la production est de près de 5 % en Chine, de plus de 5 % en Asie du Sud-est avec un effet majeur pour l'Amérique centrale et les Caraïbes avec un impact de près de + 15%.

Outre le climat, les mauvaises pratiques culturales peuvent modifier les zones sous culture comme à Hawaï qui a vu la canne pratiquement disparaître suite à une mauvaise gestion des terres (érosion) et ce au profit du tourisme.

À la Réunion, en raison de la configuration montagneuse de l'île, c'est la pression foncière qui est le principal facteur de modification des zones de production (Lagabrielle et al., 2007, Lajoie and Actif, 2001).

La pression démographique et la réduction des terres agricoles vont sans doute s'accélérer, obligeant la recherche à trouver des variétés adaptées aux milieux contraignants.

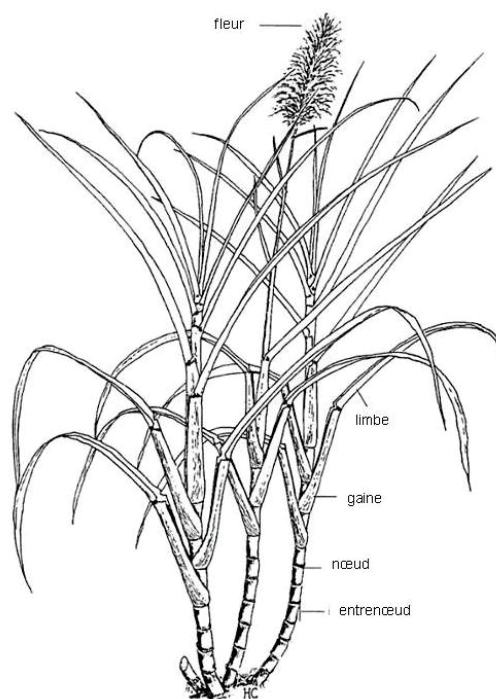
2. La canne à sucre : généralités

La canne à sucre est de la famille des Graminées et appartient au genre *Saccharum* (S.) dans lequel on trouve plusieurs espèces inter fertiles de la tribu des Andropogoneae⁵. Sur les six espèces les plus connues (Soopramanien, 2000) deux, *Saccharum spontaneum* et *S. robustum* se trouvent à l'état sauvage tandis que les quatre autres sont cultivées *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinense* et *S. edule* depuis des millénaires (Pouzet, 2011). La majorité des variétés de canne commerciales cultivées sont des hybrides interspécifiques entre *S. officinarum* ($2n = 80$) dite « canne noble » et *S. spontaneum* ($2n = 40-128$) (D'Hont et al., 1995). Leurs nombres de chromosomes sont élevés (polyploïdes) et variables, parfois anormaux (aneuploïdie). Ces caractéristiques complexifient l'étude du génome.

La photosynthèse de la canne à sucre est régie par un cycle en C4 qui lui confère une efficacité 1,4 fois plus élevée pour transformer la lumière incidente en biomasse ce que ne lui permettrait pas un cycle en C3 (Pouzet, 2011). Les plantes en C4, plus récentes dans l'évolution, utilisent plus d'énergie lumineuse, mais ont une meilleure aptitude à utiliser les hauts niveaux d'énergie lumineuse. En condition de température chaude les plantes en C4 maintiennent leur fonctionnement en limitant l'ouverture stomatique et donc réduisent la consommation d'eau. En condition de température plus fraîche, les plantes en C3 sont plus performantes (Pouzet, 2011).

La canne à sucre est une herbe géante qui se présente sous la forme d'une touffe de tiges constituées d'un empilement de phytomères, et d'un système racinaire fibreux (Soopramanien, 2000). Un phytomère est l'assemblage d'un nœud comportant un bourgeon, un anneau radicaire (Photo 3 – page 42), d'un entre-nœud, d'une feuille formée d'une gaine et d'un limbe (Figure 6).

⁵ Miscanthus et Erianthus correspondent à d'autres genres.



Source : dessin de H. Chaillet (Soopramanien, 2000)

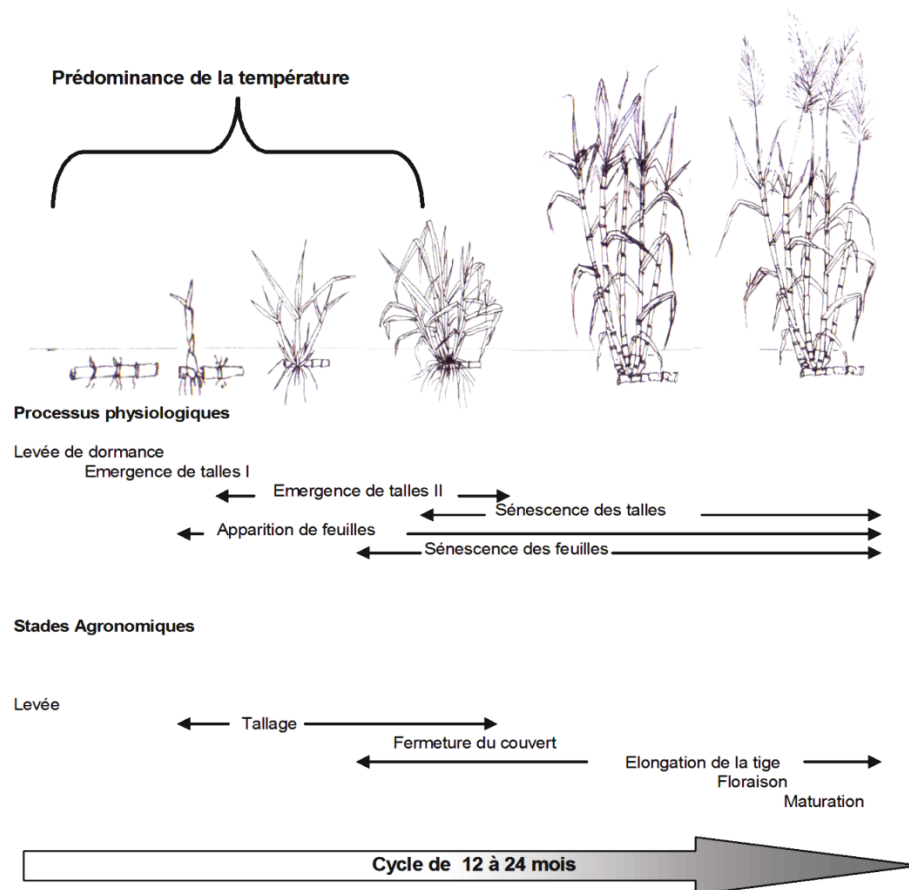
Figure 6. Plant de canne à sucre

Le Cycle de culture est composé d'un cycle de plantation qui s'achève par la récolte qui ponctue par la suite plusieurs cycles de repousse.

La canne à sucre se multiplie le plus couramment par voie végétative, on utilise une section de tige qui comporte le plus souvent entre 1 et 4 bourgeons (parfois jusqu'à 6) selon les pratiques propres à chaque régions, les morceaux de tige sont mis en terre en ligne constituant des rangs plus ou moins espacés. Pour les besoins de création variétale on a recours à des croisements par voie sexuée à partir des fleurs. En 2004, seuls 35 pays étaient dotés d'un centre de création variétale (Hellmann et al., 2005) sur les 76 qui produisaient alors de la canne à sucre (F.O. Light 2005).

D'un point de vue agronomique, les stades de levée (débourrement- levée), tallage, élongation de la tige se succèdent avec chevauchements (Figure 7). Le début de la maturation correspond à l'augmentation de la concentration des sucres du jus contenu dans la tige. Quand la concentration est maximale, les tiges « usinables » doivent être logiquement coupées et cette récolte traitée. Après récolte, la souche ancrée, déjà enracinée dans le sol donnera naissance depuis les bourgeons présents enterrés à de nouvelles talles correspondant à une nouvelle production ou « repousse ».

Dans son modèle mécaniste de culture, Bezuidenhout (2003) décrit 5 processus consécutifs amenant à l'installation de la couverture végétale de la canne à sucre : (1) Dormance (Pre-germination) : de la plantation à la levée du premier bourgeon, (2) Pré Levée (Pre-emergence) : de la levée à l'émergence hors du sol de la première tige, (3) Émission tiges primaires (Primary tiller emergence phase) : phase d'émission de la première à la dernière tige primaire, (4) Émission tiges secondaires (Secondary tiller emergence phase) : de l'émission de la dernière tige primaire à la sénescence de la première tige, (5) Sénescence des tiges (Tiller sénescence phase) de la première sénescence de tige à la récolte (Figure 7).



Source : dessin inconnu, adaptation C Poser

Figure 7. Cycle de la canne à sucre : Processus physiologiques et stades agronomiques

Selon l'ordre d'entrée en action des processus, un récapitulatif des paramètres climatiques et de leur effet sur les processus au cours du cycle de la canne est proposé dans le Tableau 1 ainsi que les références bibliographiques correspondantes. La température est le paramètre qui prédomine sur les premiers stades d'installation du couvert.

Tableau 1. Effets des paramètres climatiques sur les processus

Processus	Température	Eau	Rayonnement
Dormance	+++	+++	-
Pré levée	Min : 10°C Optimum : entre 26° et 33°C Max : sup 40° (Fauconnier and Bassereau, 1970)	Taux d'humidité ne doit pas être limitant	-
Émission de tiges primaires	+ Faible à 20 °C Croît jusqu'à 30 °C Décroît après 30 °C (Singels and Smit, 2002)		+++ (Bezuidenhout et al., 2003) ++ durée du jour (Van Dillewijn, 1952)
Émission de tiges secondaires	+ (Zhou et al., 2003)		+++ (Bonnett et al., 2005)
Émission de feuilles	+++ (Inman-Bamber, 1994)		
Sénescence des tiges	+ (Temps thermique plus faible Tb = 9°C)	+++ (Van Dillewijn, 1952)	++ plus faible au pied (Zhou et al., 2003)

Les besoins en eau et en lumière sont primordiaux pour La canne à sucre tout au long de ses cycles en plantation comme en repousse mais la température reste le paramètre prédominant particulièrement au début de l'installation de la plante (levée des bourgeons).

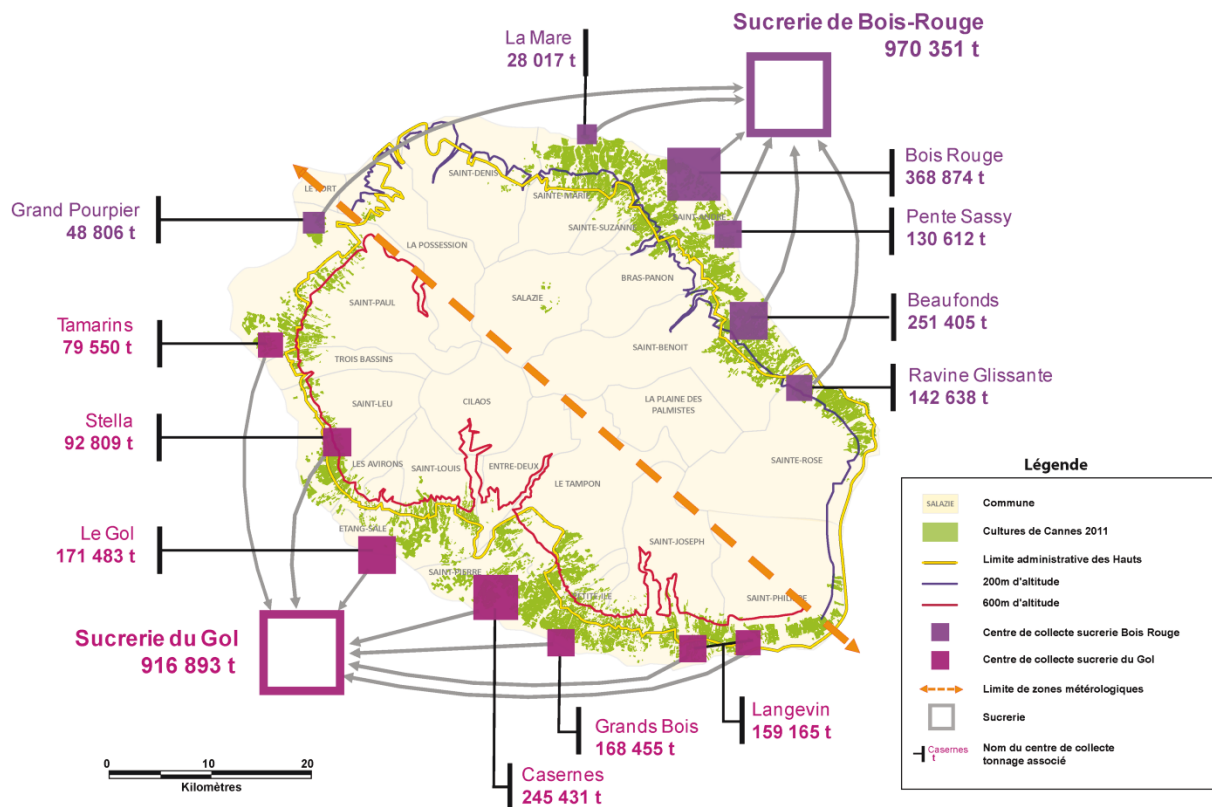
3. La Réunion et la canne à sucre

3.1. Une île ancrée dans la production de sucre

Introduite au XIX^{ème} siècle, la culture de la canne à sucre est assurée aujourd'hui par plus de 3 200 planteurs et couvre autour de 24 500 ha qui représentent 57% de la superficie agricole utilisée de La Réunion. La structure des exploitations est majoritairement de petite taille avec plus de 4/5 des structures d'exploitation inférieures à 10 ha et la moitié de moins de 5 ha.

Deux usines se répartissent le traitement industrielle de la canne à sucre (Figure 8) et sont chacune couplées à une centrale bagasse charbon pour la production d'électricité qui représente 269,9 GWh soit une part de 9,8% de la production de l'île en 2011 selon l'étude Carif-Oref - Ile de La Réunion (2013). Le groupe TEREOS déjà actionnaire majoritaire de la sucrerie de Bois-Rouge depuis 2011 est devenu majoritaire dans le capital du groupe Quartier Français en 2010 faisant de lui le seul producteur sucrier de La Réunion.

La filière canne-sucre-rhum joue un rôle important dans l'économie de l'île puisqu'elle représente 19% du montant des exportations (en seconde position derrière le tourisme), elle constitue la principale source d'emplois de l'agriculture locale, avec 10 500 personnes (9% de la population active totale) dont près de 2/3 permanents.



Source : Cirad, BD Canne 2011 DAAF, Résultats campagne 201- CTICS - (Caro canne, Mars 2012)
 Traitement Lecaillie et Poser 2012

Figure 8. Distribution géographique des parcelles sous production de canne à sucre à La Réunion et tonnages par versants, par centres de collecte et par usine.

3.2. La canne à sucre : culture pilier de l'agriculture réunionnaise

La canne à sucre reste une culture pivot incontournable pour la solidité financière des exploitations réunionnaises, pour l'appui de leur diversification (DAAF, 2013). Avec un marché assuré en quantité et en prix très récemment confortés par les décisions de l'Europe jusqu'à l'horizon 2020, la filière canne-sucre-rhum réunionnaise possède des atouts économiques. Elle possède aussi des atouts environnementaux (Courteau, 2005). On peut noter sa contribution :

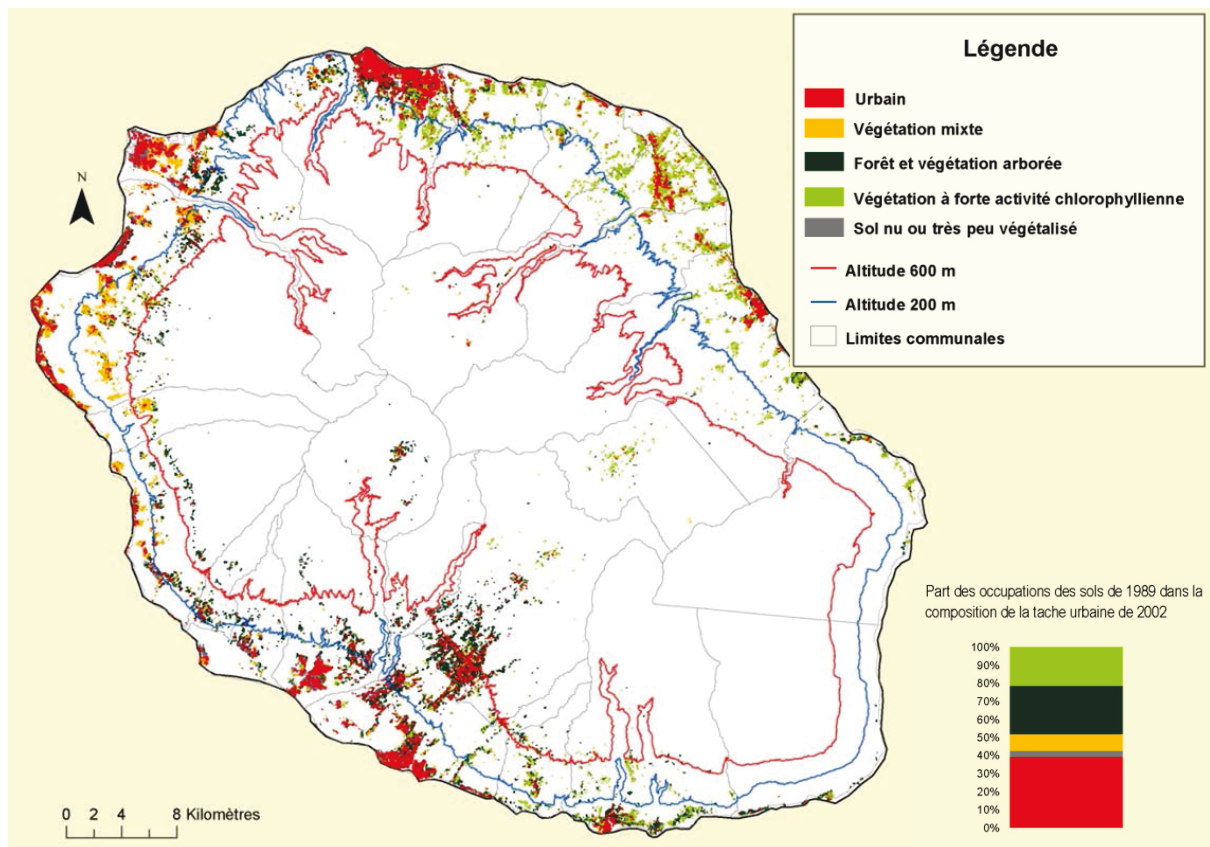
- à la lutte antiérosive par un système racinaire très développé et profond (Chopart and Marion, 1994),
- à la préservation de l'environnement puisqu'elle consomme relativement peu d'intrants,
- à la fourniture d'énergie renouvelable,
- aux paysages, contribution reconnue par les touristes.

Enfin on ne peut oublier que les cyclones qui ont sévi sur La Réunion ont eu sur la culture de la canne un impact moins catastrophique que cela ne peut l'être sur toute autre culture moins résistante pour laquelle les dégâts entraînent la perte totale de la récolte et éventuellement de la culture. Ce contexte est tout de même entaché par des difficultés dans l'exploitation de la culture liées à aux terrains à la topographie accidentée et aux parcelles de petite taille ainsi que par les contraintes foncières (DAAF 2013).

3.3. Une forte pression foncière

La filière réunionnaise tient à maintenir un niveau de production de canne à sucre suffisant pour rentabiliser son outil industriel (Caro canne, Avril 2006). Outre le fait d'augmenter la productivité à l'hectare, l'objectif jusqu'alors maîtrisé est de maintenir au niveau de l'île la même superficie totale sous culture voire même d'étendre les surfaces de culture approvisionnant les deux usines.

Dans ce contexte, il existe une forte concurrence pour l'occupation du sol. La croissance des espaces urbains est une préoccupation majeure pour La Réunion (Lajoie and Actif, 2001) dont la croissance démographique est forte avec 1,2 % de taux de variation annuel (taux deux fois supérieur à celui de la métropole - site INSEE 2013 - données 2006-2012). Les ressources foncières agricoles réunionnaises sont limitées (Martignac and Pariente, 2003, Lajoie and Hagen-Zanker, 2007). L'urbanisme a converti des terrains à vocation agricole ou autre en constructions ou infrastructures immobilières, industrielles et routières. Une étude de 2004, dans le cadre du projet TEMOS (Télédétection pour l'Etude des Modes d'Occupation du Sol) a permis d'identifier les parts respectives des différents types d'occupation avant que ceux-ci ne soient convertis entre 1989 et 2002 (Lagabrielle et al., 2007, Martignac, 2006). L'étalement urbain ou « tache urbaine » est multiplié par 3 passant ainsi de 2 % à 6 % de l'occupation totale du sol de l'île au cours de ces 13 ans tandis que les zones identifiées comme étant à forte activité chlorophyllienne, principalement des surfaces sous canne à sucre conservent un solde stable avec une proportion de 19%. L'urbanisme a développé son extension sur 8 200 ha à raison de 6 % sur des sols nus, 15 % sur de la végétation mixte (savanes), 43 % sur de la végétation arborée et enfin 36 % sur des surfaces dédiées à la culture de la canne à sucre (Lagabrielle et al., 2007). La filière canne à sucre a ainsi perdu près de 28 % de sa surface qu'elle a su compenser en totalité en récupérant à 80 % sur de la végétation arborée et à 20 % sur de la végétation mixte (Figure 9). L'urbanisation a notamment affecté des espaces dans le Nord-Est de l'île (Martignac, 2006)(Figure 9) qui correspond à la zone où l'occupation des sols par la canne à sucre est la plus forte (Figure 8). Les régions Sud et Est de l'île enregistrent une perte importante de surface sous canne tandis que les régions Ouest et plaine des Palmistes bénéficient de gains qui ont compensé les pertes.



Source projet TEMOS 2004 (Martignac, 2006)
 Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 9. Origine de la tâche urbaine entre 1989 à 2002

Ainsi, au vu de l'emprise de l'urbanisation sur les terres à canne, qui se tient surtout dans les zones plus faciles à aménager comme le littoral (Figure 9), il est nécessaire de conquérir de nouvelles terres valorisables. Les espaces propices libres sont constitués principalement de terrains en friche, situés le plus souvent en altitude mais aussi de terrains, pour l'Ouest, ayant ou devant bénéficier de l'accès à l'eau d'irrigation dans le cadre du projet ILO⁶.

À La Réunion particulièrement, la concurrence entre terre à canne et urbanisation ne s'arrêtera pas et la conquête de terres agricoles dans des environnements difficiles pour implanter de nouvelles surfaces en canne est un vrai défi pour les acteurs de la filière canne à sucre.

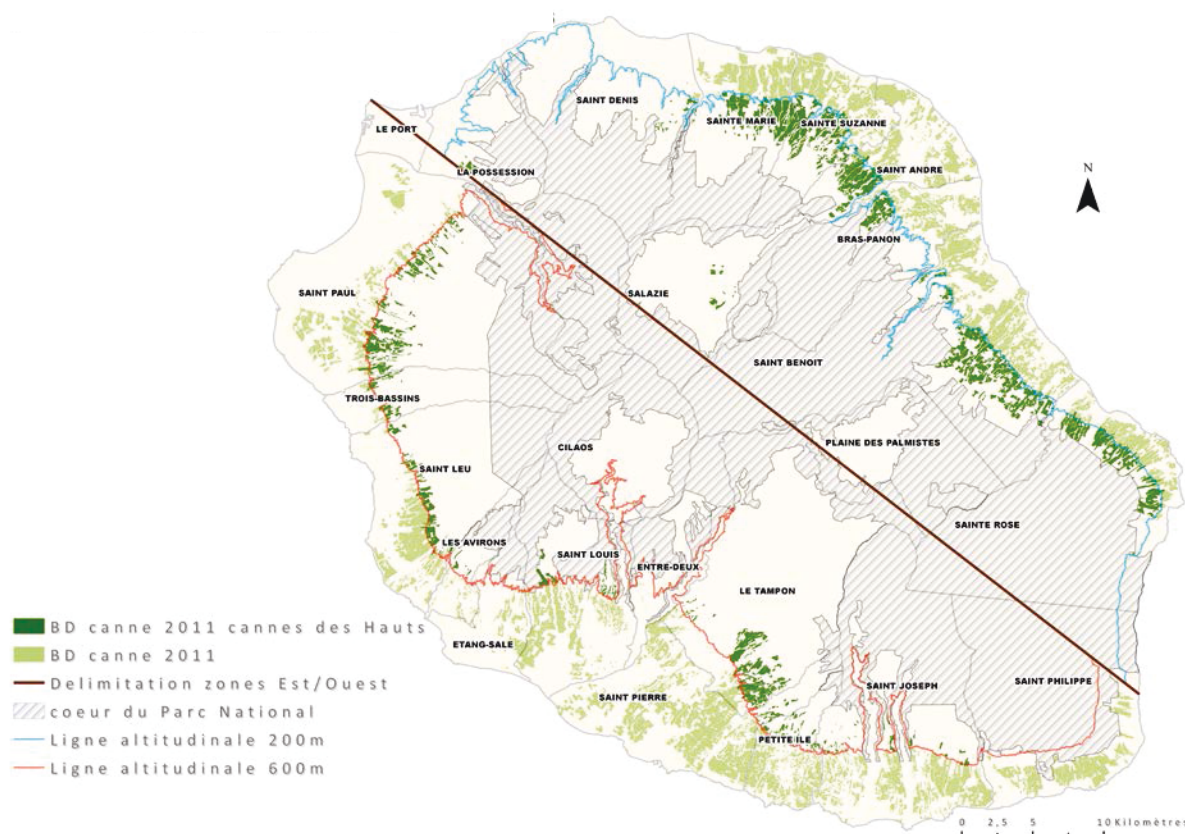
3.4. Les Hauts : une zone de contraintes

Les Hauts de La Réunion ont été habités en premier par des esclaves en fuite (« marrons »), puis c'est lors des dernières décennies du XIX^{ème} siècle que des Blancs sans terre (« Petits Blancs des Hauts ») les ont rejoints, attirés par l'espace disponible et la possibilité de cultiver ou de faire de l'élevage. Les terres difficilement accessibles, le plus souvent à pied, sont enclavées par les nombreuses ravines qui complexifient les échanges internes comme ceux avec Les Bas. La Route Hubert Delisle construite pratiquement au niveau de la cote 800m d'altitude en 1856 permet de desservir les Hauts de L'Ouest

⁶ Projet ILO : basculement des eaux d'Est en Ouest pour lequel plus de 7 000 ha agricoles sont concernés.
http://daaf974.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/article_ILO_internet_DAF_cle886b89.pdf

qu'elle désenclave (Vaxelaire, 2001). Selon l'altitude et les époques, les cultures du géranium et de la canne à sucre ainsi que l'élevage seront en concurrence (Valy, 1990).

Dans le cadre de notre étude nous restreindrons les Hauts aux zones potentiellement agricoles au-dessus de 200 mètres d'altitude pour la côte Est et au-dessus de 600 mètres pour la côte Ouest correspondant à des zones de contraintes thermiques et/ou radiatives (Pouzet et al., 2004), dans les deux cas hors zone de protection du Parc Naturel (Figure 10).



Source : Cirad, BD Canne 2011 DAAF (Pouzet et al., 2004)
Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 10. Limites des Hauts de la Réunion et parcellaire cannier

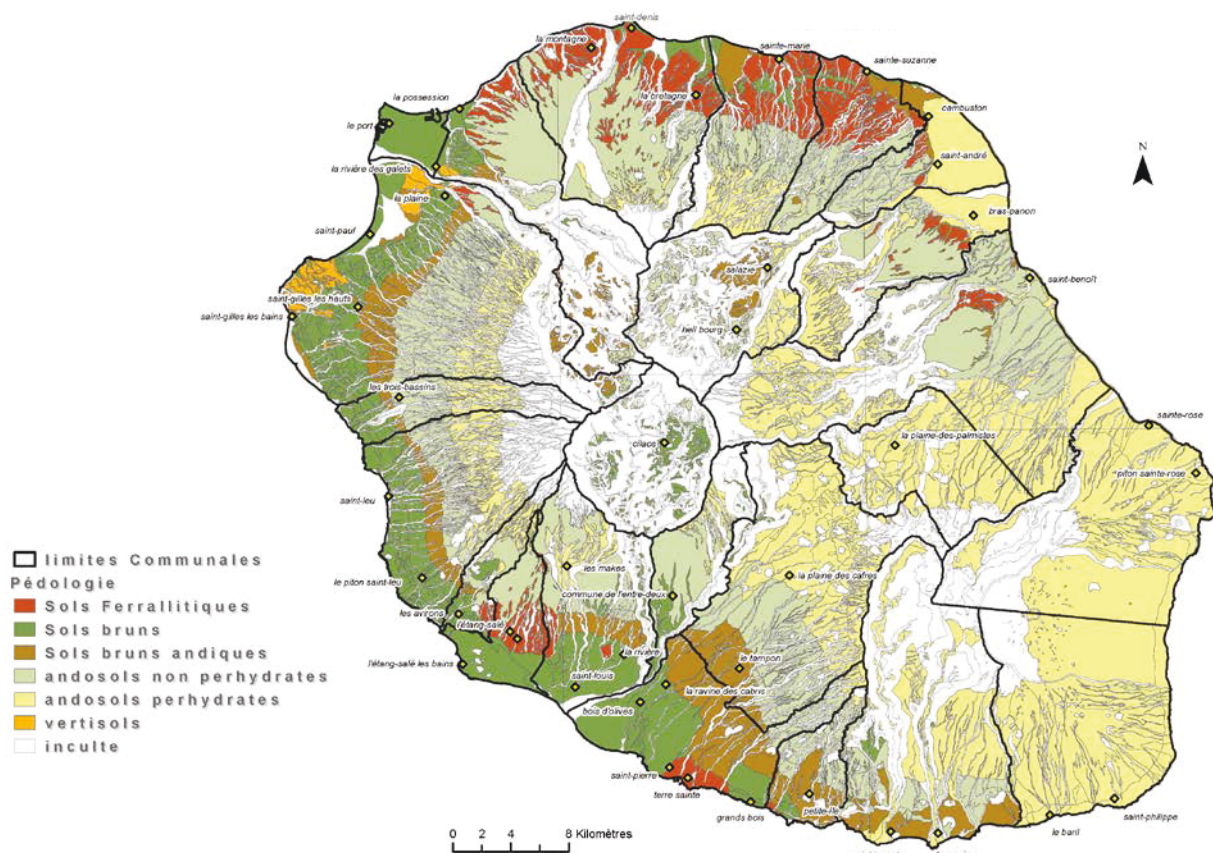
Cette zone de production représente pour l'ensemble de l'île : 26 % de la sole cannière et seulement 18 % de la production avec respectivement pour l'Est et l'Ouest des surfaces de 35,5 % et 18,1 % pour des productions de 25,6 % et 12,1 % (Pouzet et al., 2004).

L'écart de production, qui correspond à des rendements plus faibles s'explique par trois raisons principales :

- Du point de vue édaphique, les sols d'origine volcanique sont moins dégradés, nous sommes à l'Ouest en présence d'andosols à forte capacité de rétention hydrique (Perret, 1992), mais l'eau y est paradoxalement peu disponible. À l'Est, sont principalement présents des sols ferralitiques, pauvres en matière organique (Figure 11). La faible disponibilité de l'eau ou une mauvaise structure du sol pénalise le développement de la culture.

- Jusqu'alors le schéma de sélection variétale pratiqué ne permettait pas de sélectionner des variétés spécifiquement adaptées aux zones d'altitude. Le programme de sélection se réalisait majoritairement sur les terrains du site de La Bretagne, une zone littorale irriguée. Aujourd'hui encore, les deux variétés dominantes dans les Hauts de l'Ouest sont R570 et R577 (Figure 18 page 40), toutes deux sélectionnées à La Bretagne.
- Enfin, le climat qui prévaut dans Les Hauts est pénalisant pour la culture de la canne. Température plus basse (inférieur de 5°C à 6°C), ensoleillement réduit (moins 30%) et apports en eau irréguliers et mal répartis (Données Cirad - Météo-France 2011 - portail Margouill@).

La contribution des Hauts à la production de canne à sucre de l'Île reste indispensable à la filière et à l'équilibre économique des exploitations des Hauts (Caro canne, Novembre 2004). Le différentiel de production à l'hectare peut d'ailleurs être abordé comme une marge potentielle de gain de productivité à condition de lever ou contourner les contraintes qui pénalisent les rendements.



Source : BD Topo 2003 IGN, données pédologiques Cirad-Région Réunion 1991
Traitement Lecaille 2012

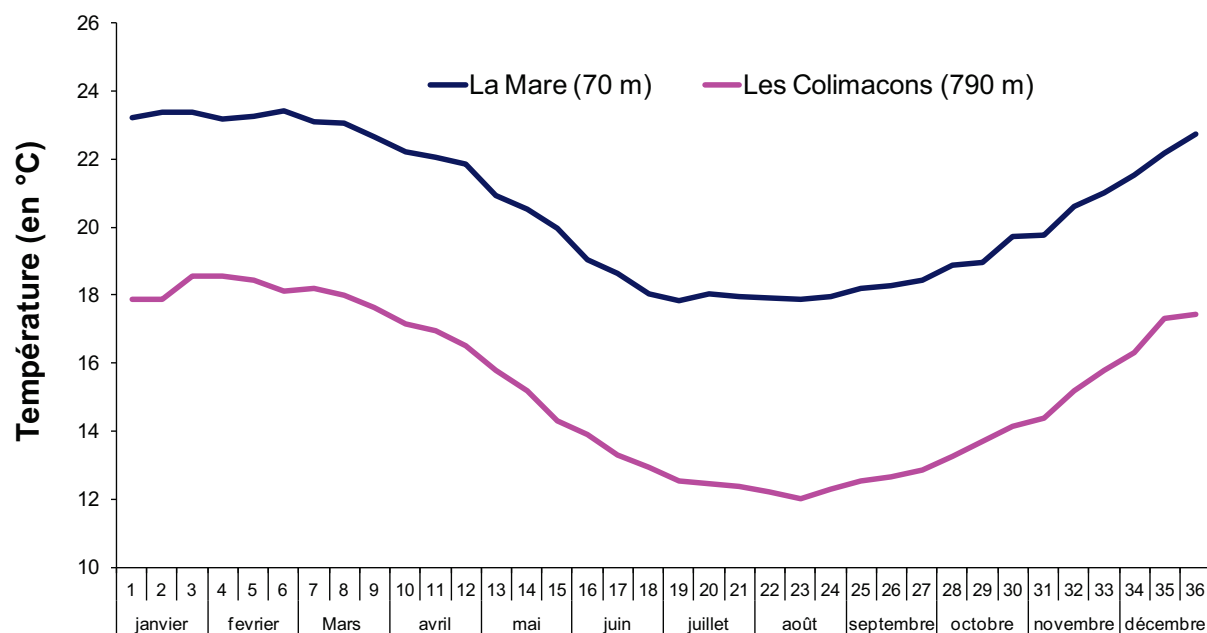
Figure 11. Carte pédologique de La Réunion

Les contraintes les plus importantes qui pénalisent la culture de la canne à sucre dans les Hauts de l'île de La Réunion sont déclinées ci après :

a) Température

La différence des températures moyennes (minimales) interannuelles décennales sur les 10 dernières années (Figure 12) entre les relevés d'une station météorologique des Hauts (Colimaçons : 850 m) et une station située sur le littoral (La Mare : 10 m) est de l'ordre de 6°C. Les écarts thermiques entre la

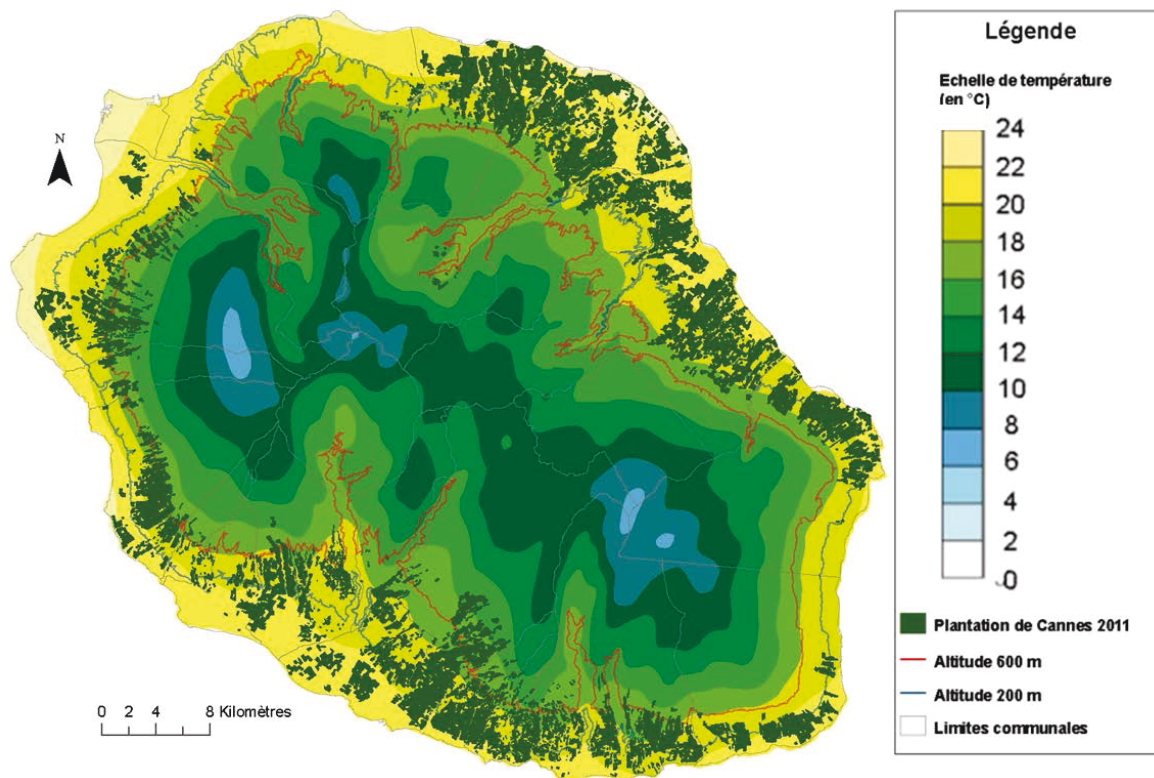
saison chaude (cyclonique de décembre à mars) et la saison fraîche (de juin à septembre) est également de l'ordre de 6°C (Données Cirad - Météo-France 2010 - portail Margouill@).



Source : propriété Cirad - Météo France

Figure 12. Moyenne décadaire des températures minimales de l'air sur 10 ans (2002-2011) pour les stations météorologiques des Colimaçons (790 m) et La Mare (70 m).

Les Hauts sont confrontés à des températures relativement fraîches, particulièrement durant l'hiver austral (Figure 13).

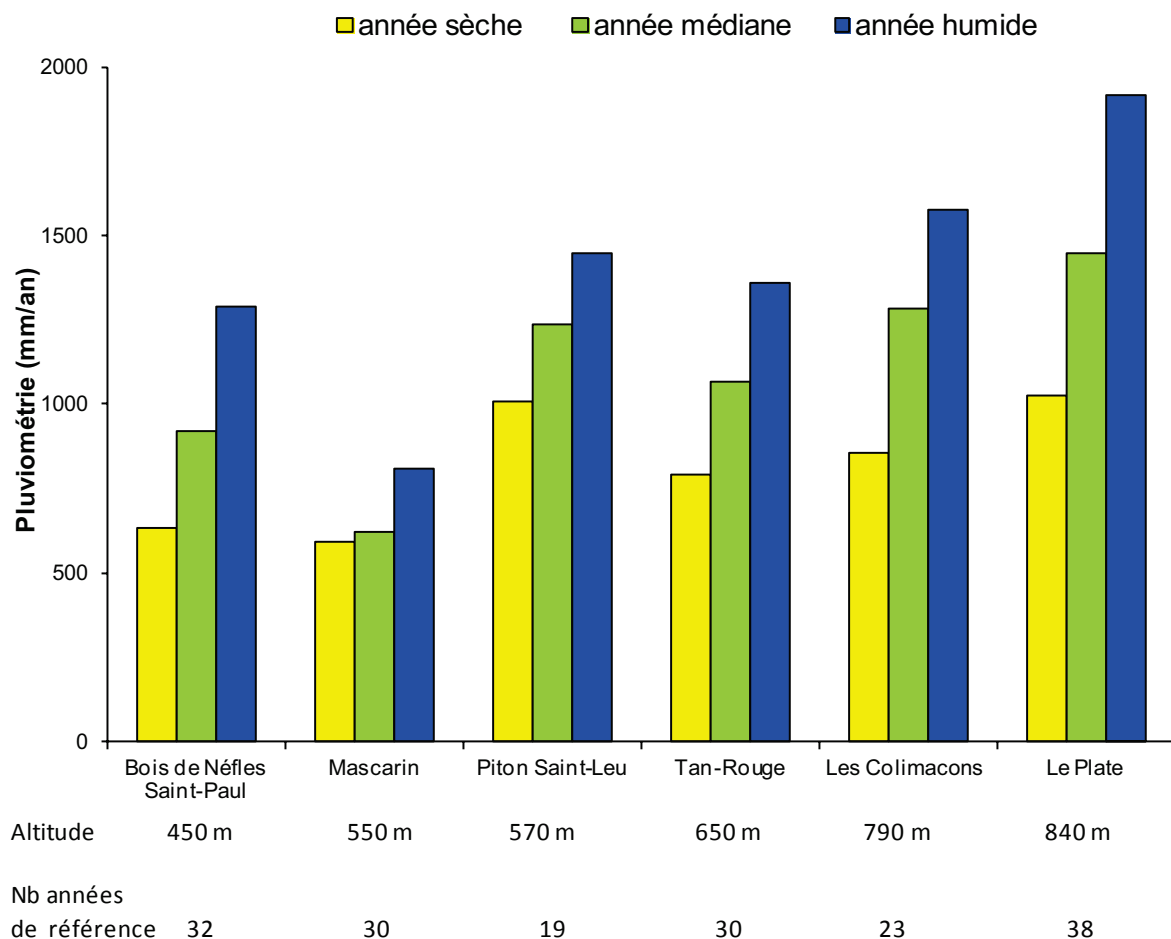


Sources : BDPA 2011 DAAF de La Réunion, Météo-France – Direction Interrégionale de La Réunion
Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 13. Carte des isothermes du mois d'Août de La Réunion (moyennes sur 10 ans)

b) Régime pluviométrique

L'île de la Réunion détient de nombreux records de pluviométrie enregistrés par cumul pour des durées allant de 12 h à 15 jours, sur les zones d'altitude du volcan (Jumaux et al., 2011). Les précipitations pour Les Hauts sont caractérisées par leur distribution déséquilibrée sur l'année et leur irrégularité d'une année sur l'autre. Une étude sur les potentiels de production de la canne à sucre dans les Hauts en condition irriguée réalisée sur les Hauts de l'Ouest (Vivet, 2005) illustre ce régime. Les données pluviométriques journalières de 6 stations réparties sur le versant Ouest de 450 à 800 m d'altitude collectées sur 19 à 38 années selon les stations ont été utilisées pour ce travail. Une analyse fréquentielle de ces pluviométries fournit les pluviométries moyennes en année normale (1 année sur 2), quinquennale sèche (la plus sèche sur 5) et humide (la plus humide sur 5). On peut constater des écarts importants de régime hydrique entre années « sèches » et « humides » (Figure 14) avec des quantités de pluie qui peuvent augmenter de plus de 80% comme pour les stations Les Colimaçons et Le Plate et même du simple au double comme pour la Station de Bois de Nèfles Saint-Paul. Il n'y a pas d'effet linéaire systématique entre les précipitations annuelles moyennes et l'altitude : Station des Mascarins plus sèche et celle de Bois de Nèfles Saint-Paul et Tan-Rouge plus sèche que Piton Saint-Leu.



Source : données propriété Cirad - Météo France (Vivet, 2005)
(19 à 32 années de référence)

Figure 14. Pluviométrie moyenne annuelle en années sèches, médianes et humides (mm)

Durant certaines périodes de l'année, les précipitations ne suffisent pas à compenser l'évapotranspiration (Figure 15). Ces périodes de déficit hydrique ne sont pas propices à la

plantation. Les stations situées en altitudes sont en moyenne plus arrosées durant cette période et les périodes de déficit plus courtes : vingt sept décades déficitaires (3/4) au niveau de la station Mascarin à 550 m d'altitude contre douze (1/3) sur celle du Plate à 840 m.

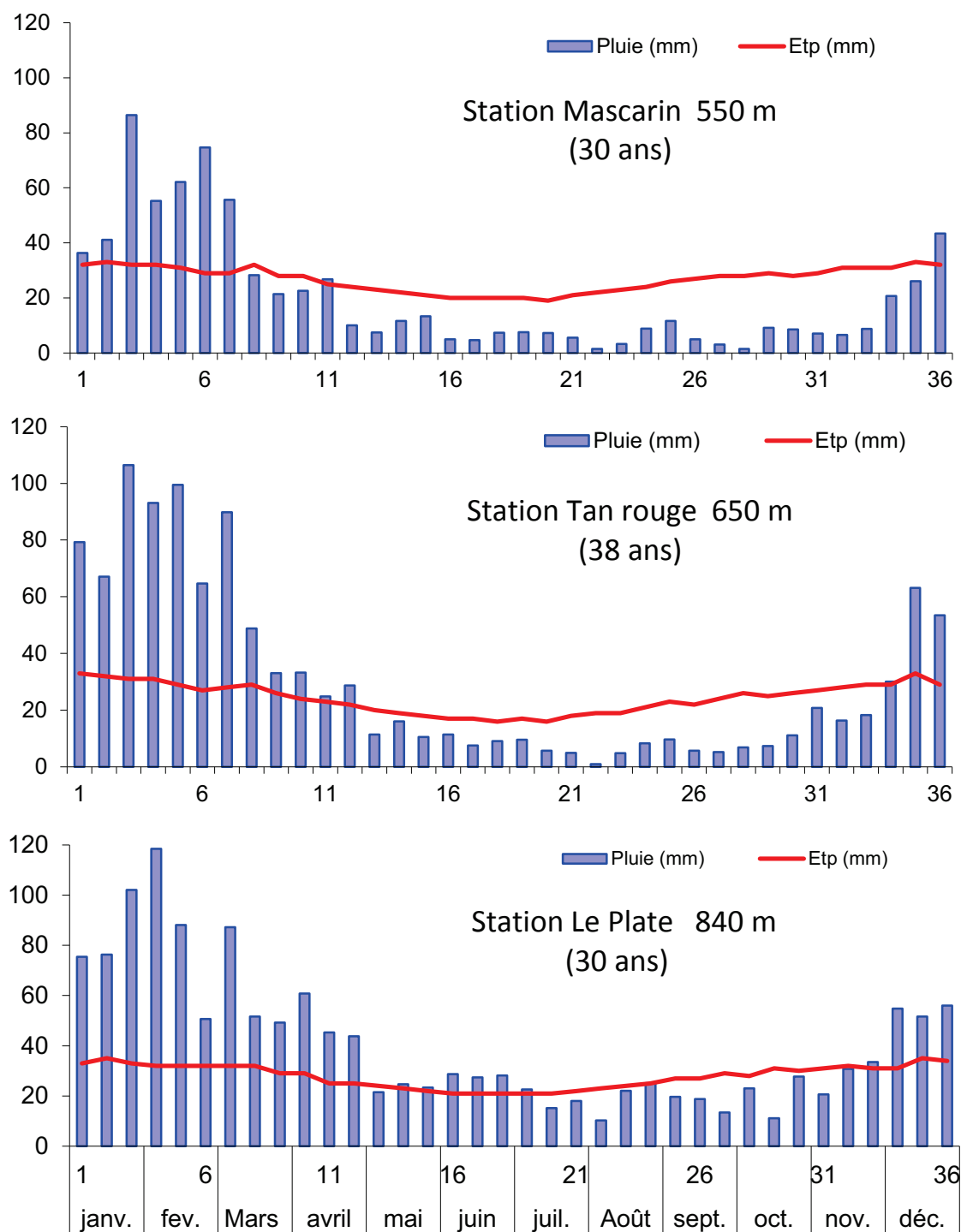
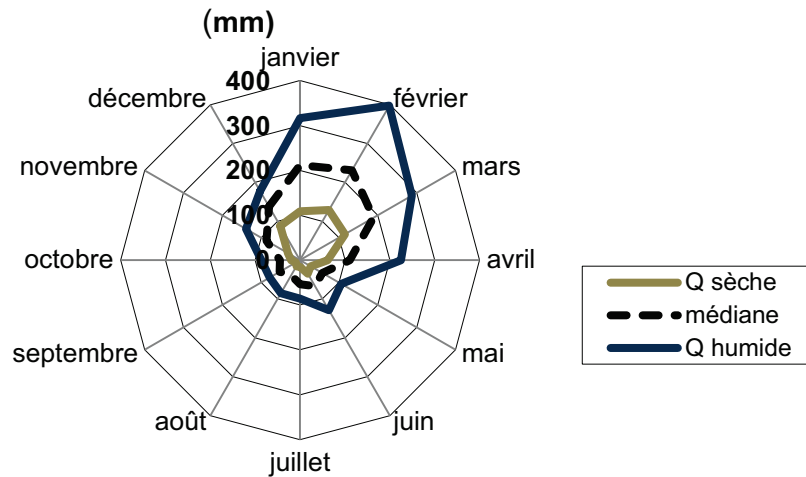


Figure 15. Moyennes décadales des pluie et de l'ETP sur 3 Stations de la côte Ouest (Nombre d'années de référence entre parenthèses)

Il existe de grands écarts entre les pluviométries des années sèches et celles des années humides, mais aussi à l'intérieur de la saison des pluies qui peuvent durer par exemple au Plate de 3 à 6 mois (Figure 16). Durant le stade de d'implantation de la canne, depuis la levée jusqu'à la phase de tallage

(Figure 7 page 25) les besoins en eau sont réduits (K_c de 0,40 selon l'équation de Penman–Monteith 1996 (Allen et al., 1998)) mais il est impératif que le sol soit humide pour ne pas compromettre l'installation du jeune plant. Il est donc logique qu'en condition non irriguée la saison humide soit privilégiée pour la plantation.



Source : propriété Cirad - Météo France (Vivet, 2005)
(30 années de référence)

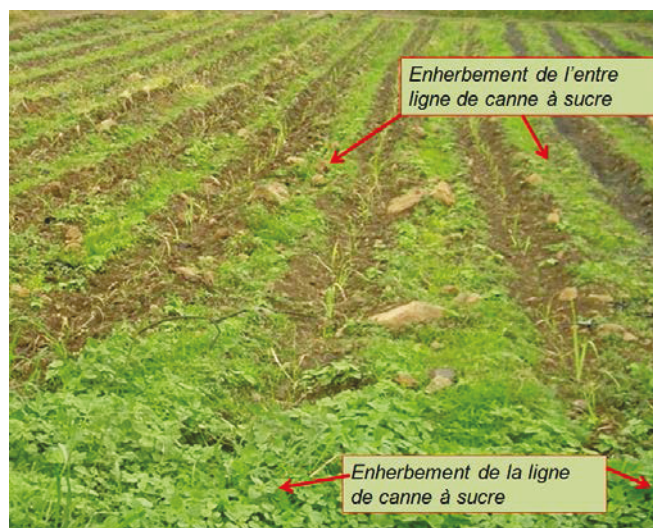
Figure 16. Analyse fréquentielle de la pluviométrie mensuelle (mm) à Le Plate (840 m) entre 1969 et 1999

c) Rayonnement

La présence de masses nuageuses (par brise de mer, liée à l'effet orographique) et l'effet de Föhn vont concentrer la présence de ces dernières sur les Hauts réduisant ainsi le rayonnement solaire disponible pour les plantes. Le rayonnement journalier dans les Haut peut être réduit jusqu'à 30 % comme au mois de novembre durant lequel il est de 24 MJ/m² en moyenne sur la Station de la Mare (70 m) contre 14 MJ/m² sur celle des Colimaçons (790 m) (Martiné, 2003). Ce déficit de rayonnement va avoir pour effet d'abaisser la température et de réduire l'activité photosynthétique de la plante, deux conséquences particulièrement pénalisantes lors de l'installation de la plante (Tableau 1 page 26).

d) Autres contraintes notamment biotiques

Outre les contraintes édaphiques et climatiques qui pénalisent la culture de la canne à sucre dans les Hauts de l'île, il existe une forte concurrence avec les adventices toujours mieux adaptées aux contraintes thermiques et radiatives de ces zones. Lors de l'implantation de la culture, les champs préparés par au moins un labour constituent un terrain favorable au développement et à la prolifération des adventices (Photo 2). La concurrence était jusqu'alors d'autant plus déséquilibrée en faveur des adventices qu'il n'existait pas de variété spécifiquement sélectionnée pour Les Hauts.



Multiplication de nouvelles variétés bouture à un seul bourgeon Cirad/Cerf 2007 chez M Lorion (Cliché : C. Poser)
Photo 2. Concurrence de l'enherbement lors de l'implantation de la culture

On considère que la croissance de la canne est ralentie par la concurrence que représentent les adventices en compétition pour l'eau, pour les éléments nutritifs et pour la lumière. Cette concurrence existe dès la levée jusqu'à la fermeture du couvert végétal (McMahon et al., 2000) c'est-à-dire entre le 1^{er} et le 4^{ème} mois après la plantation (Marion and Marnotte, 1991). Les pertes peuvent atteindre 10 à 12 % par mois de culture. Si les adventices ne sont pas convenablement gérées notamment entre la préparation de sol pour la plantation et la fermeture du couvert, l'enherbement peut même devenir un problème récurrent sur l'ensemble du cycle de plantation par infestation de semences d'adventices (Pouzet, 2011).

Les bioagresseurs peuvent être aussi à l'origine de chute de rendement en canne à sucre, parfois significatives (tonnage et qualité du sucre). Un insecte ravageur, le foreur ponctué des tiges, *Chilo sacchariphagus* (Lepidoptera: Crambidae), présent à La Réunion peut entraîner des pertes de rendement allant jusqu'à 25 % selon Goebel (1999) cité par Nibouche (2008). On peut citer également le ver blanc (*Hoplochelus marginalis* (Coleoptera, scarabaeidae) qui a fait l'objet de recherches ayant abouties à un programme de lutte biologique qui est toujours en vigueur (Jeuffrault et al., 2004) et dont les recherches sur les souches du champignon utilisé se poursuivent avec une collaboration entre La Réunion et l'Afrique du Sud (Goble et al., 2012). Ces deux bioagresseurs représentent les principales pressions parasitaires à La Réunion, qui tendent à s'amoinrir dans le Hauts sachant que la température est un facteur limitant pour le développement des insectes, particulièrement pour les foreurs de tige (Goebel, 1999). Cet auteur montre qu'une température de 15°C perturbe le cycle de développement de ce foreur, et donc son impact. Sur le plan des maladies à bactéries et virus, la pression est fortement contrôlée depuis 85 ans par le programme de sélection variétale d'eRcane (anciennement Cerf) qui intègre un volet drastique de résistance aux maladies de la canne et qui s'appuie sur une collaboration avec les phytopathologistes du Cirad depuis 50 ans. Cette collaboration a conduit à développer une quarantaine sanitaire de tout premier plan, située à Montpellier. Les variétés sélectionnées sont donc majoritairement résistantes aux 26 maladies présentes à La Réunion sur près de 120 maladies recensées dans le monde (Rott et al., 2000). Les Hauts sont exposés comme le reste de l'île à des épisodes cycloniques entraînant l'alternance de périodes humides et sèches propice au développement de champignons et bactéries pathogènes. Les basses températures qui prévalent dans les Hauts peuvent être un facteur favorisant le développement de ces agents pathogènes comme c'est le cas pour *Ceratocystis paradoxa* (Dade) qui est à l'origine de la maladie de l'ananas (Pineapple disease). Ce champignon vit dans le sol, il

s'attaque principalement aux tissus des boutures, lors de la plantation et empêche la levée des bourgeons; il est particulièrement efficace quand la levée est lente (Girard and Rott, 2000), comme c'est le cas dans les Hauts.

De nombreux autres facteurs rendent l'exploitation de la canne à sucre par les agriculteurs plus contraignante dans les Hauts :

- Les parcelles sont généralement de taille réduite,
- Les parcelles sont en pente et pierreuses (Photo 2) ce qui les rend difficilement mécanisables,
- Peu de terrains ont accès à l'irrigation, les fenêtres de plantation peuvent être réduites d'une année sur l'autre dans un contexte limité de ressources en main-d'œuvre et donc plus onéreux,
- Enfin, la maturation des cannes est moins bonne (les taux de sucre sont plus faibles) et plus tardive alors que le principe de quotas fixes et réguliers⁷ impose aux planteurs des livraisons tout au long des 6 mois de campagne sucrière.

Dans les Hauts, de nombreuses contraintes existent pour la canne et elles sont principalement d'ordre abiotique : déficit de rayonnement, températures fraîches, croissance ralentie... Les bioagresseurs, en particulier les insectes, exercent une pression plus faible dans ce type d'environnement en raison principalement du facteur limitatif des températures.

3.5. Des variétés nouvellement adaptées

À la Réunion, c'est eRcane institut technique financé par les industriels additionnés des planteurs depuis 2010 qui crée et sélectionne les variétés depuis 1929. Cette sélection est longue (15 ans) et coûteuse. Le coût de la création d'une variété revient en simplifiant au fonctionnement annuel de cet institut puisqu'en moyenne une variété est libérée⁸ chaque année et devient disponible pour la communauté des planteurs. La sélection orientée par environnement a débuté en 1989, date à laquelle, sous conseil d'une mission d'experts d'Hawaï, le Cerf a construit des stations réparties sur l'île (aujourd'hui au nombre de 7) sur lesquelles sont désormais sélectionnées les variétés créées dans un environnement proche de celui auquel elles sont destinées (Caro canne, Décembre 2010). L'emplacement des stations eRcane ainsi que le statut variétal en 2011 est présenté sur la Figure 17. Pour les Hauts de l'île la station de Vue Belle 1 (650 m) a vu le jour en 1998. Vue Belle 2, initiée en 1999 est d'une superficie plus modeste mais permet de tester in situ des variétés dans un environnement très sélectif à 1000 m d'altitude. Cette sélection multi locale s'est avérée fructueuse puisqu'en 2008 une variété issue du croisement réalisé en 1991 de R575 (originaire de La Réunion) avec H72/8597 (originaire d'Hawaï) a donné le clone R92/4031 en test sur Vue Belle 1 puis Vue Belle 2 et finalement libéré sous le nom de R583. Sa production en biomasse et en sucre, en condition

⁷ Le quota de livraison des planteurs est fixé par l'usine en commission mixte en divisant la production annoncée par estimation par le nombre de jours que dure la récolte ou campagne sucrière.

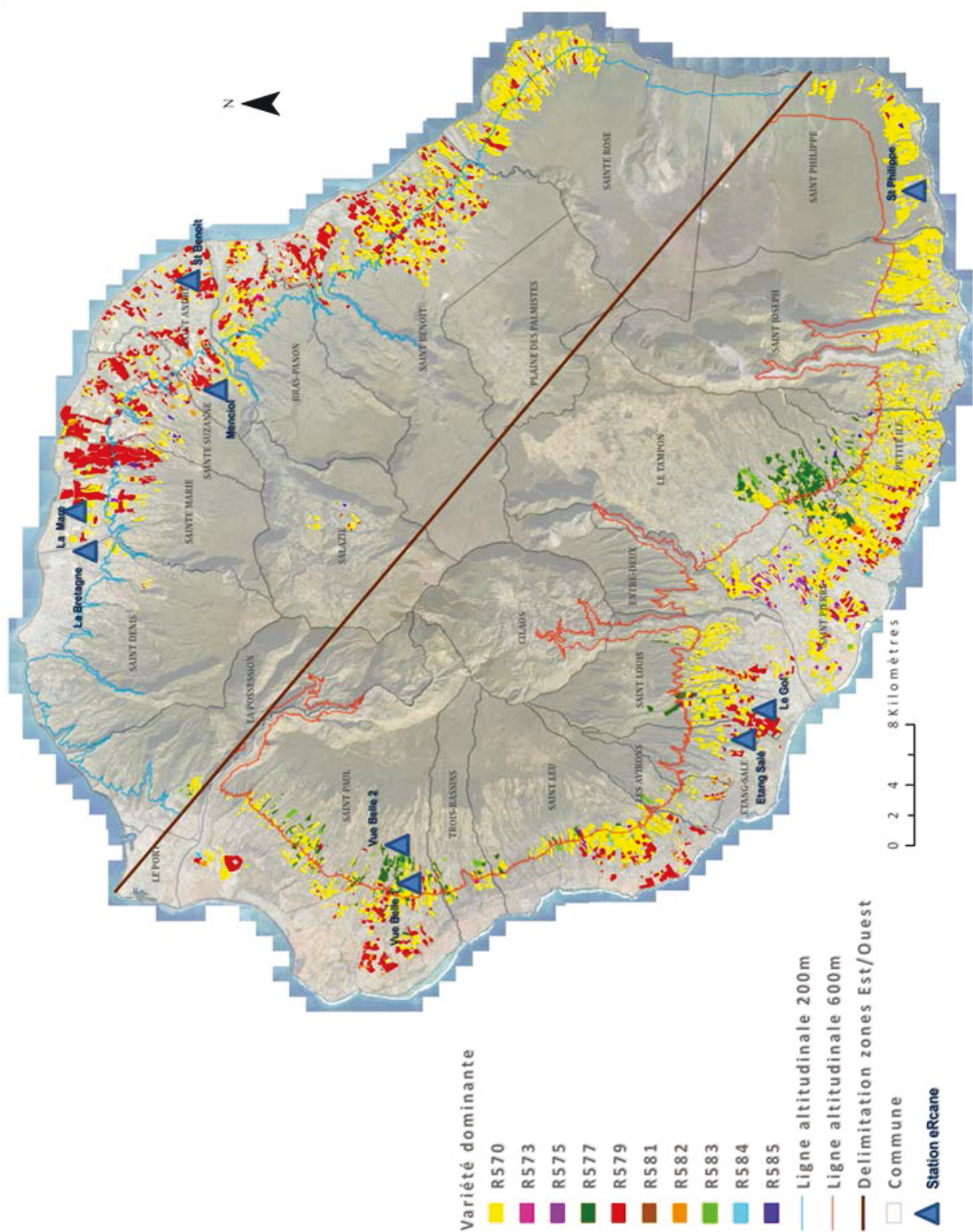
⁸ Une variété est dite « libérée » quand elle a passé tous les stades de sélection et qu'elle est disponible pour la communauté des planteurs, elle passe alors du nom du clone de la série de sélection à son nom commercial (R 92/0804 à R585 par exemple)

d'altitude est bien au dessus des variétés précédemment cultivées selon les données de eRcane (Caro canne, Mars 2012, Poser et al., 2012).

Un second clone, 92/0804, issu du même croisement (parents R575 et H72/8597) a été créé la même année et libéré en 2010. Outre sa très forte productivité en biomasse, ce clone produit une proportion plus grande de fibre (20 à 30 %) et s'est avéré également particulièrement adapté pour les Hauts de l'Est.

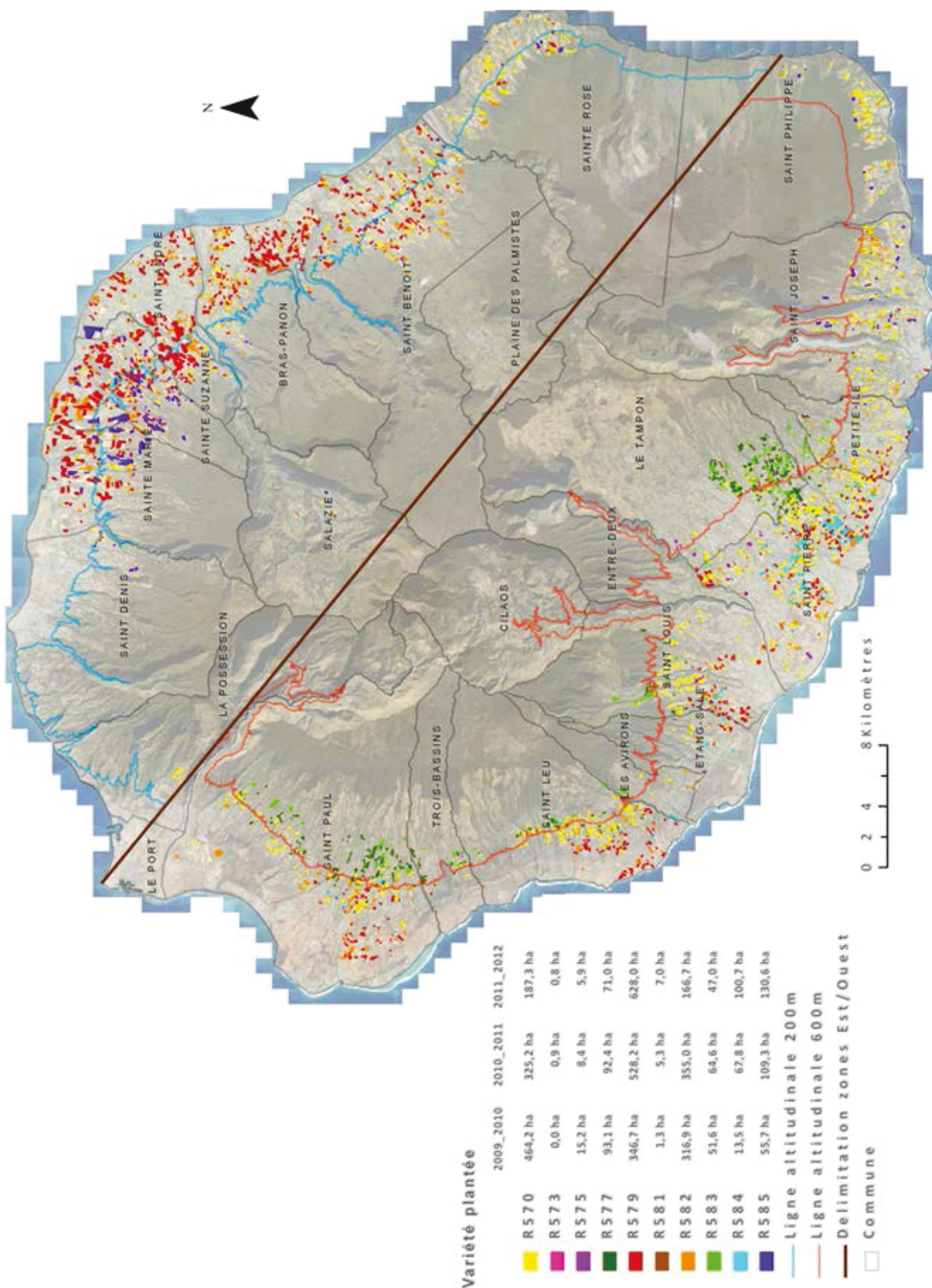
Pour les saisons de plantation⁹ 2009-2010 et 2010-2011 les deux variétés ont été plantées en superficies cumulées, sur 116 ha pour la R 583 dont 97 ha (83 %) dans les Hauts de l'Ouest et sur 165 ha pour la R 585 dont 72 ha (44 %) pour les Hauts de l'Est (Figure 18).

⁹ La saison de plantation, pour des raisons administratives est calée sur la campagne sucrière de juillet à juin.



Sources : BD canne 2011 DAAF, BD ortho 2008 IGN, BD variété Service Relations Clients/SIG CTICS DAAF TEREOS Océan Indien – Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 17. Distribution des variétés sur l'île de La Réunion en 2011 et localisation des stations eRcane.



Sources : BD ortho 2008 IGN, BD plantation Service Relations Clients/SIG CTICS DAAF TEREOS Océan Indien - Traitement Lecaille et Poser 2012

Figure 18. Plantation des variétés R 583 et R 585 lors des saisons 2009-2010, 2010-2011, et 2011-2012 sur les côtes Ouest et Est.

Les planteurs adoptent rapidement ces deux nouvelles variétés et reconnaissent dès lors des premières plantations leurs performances. Un planteur relate qu’il obtient sur ces terrains situés à

900 m d'altitude, un tonnage plus que doublé en comparaison avec les variétés précédemment plantées (Caro canne, Décembre 2010).

La sélection des variétés pour les milieux en altitude a permis de mettre à disposition des planteurs des variétés de plus en plus performantes.

4. L'implantation de la culture : une étape capitale dans Les Hauts

Une bonne mise en place du couvert végétal est considérée comme la base d'une bonne récolte écrit Van Dillewijn (1952). Dans cette étude nous partons du principe que c'est la phase d'implantation qui représente la phase critique d'installation du peuplement. Les manques sont des espaces le long de la ligne de canne où aucun pied n'est présent. Ils engendrent une baisse de rendement qui perdure au fil des cycles de récolte (Stolf et al., 1986). Les milieux soumis à des contraintes biotiques ou abiotiques seront ainsi plus contraignants et ce, dès la phase d'implantation en cycle de plantation.

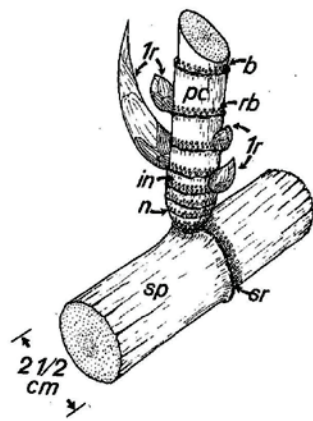
4.1. Des repousses marquées par les conditions d'implantation

La plante se comporte comme si elle gardait en mémoire les conditions de sa mise en culture. Conditions thermiques et manques à la levée en canne plantée pèsent en effet sur les performances en repousses. Gascho (1973) démontre sur 5 variétés en Floride que les conditions de température qui prévalent au moment de la levée d'une canne à sucre plantée influent sur le nombre de talles de sa repousse ainsi que sur leur poids et leur teneur en sucre et donc sur le rendement.

Un manque de pied de canne à sucre sur une distance inférieure à 0.50 m n'a pas d'incidence sur le rendement (Stolf, 1986). Après avoir mis au point une méthode d'estimation des manques sur une parcelle sous canne à sucre à l'aide d'un indice, Stolf (1986) a estimé les pertes relatives aux manques d'abord sur de la canne plantée, puis sur des cannes en repousse (Stolf et al., 1991). Il constate que les manques engendrent des baisses de rendement et que ceux-ci sont plus importants en quantité (t/ha) en canne plantée (18 mois) qu'en repousse (12 mois), le pourcentage relatif de perte par rapport à la production reste cependant constant. C'est la preuve qu'une mauvaise implantation en cycle de plantation a une influence non seulement dès la première récolte mais entraîne aussi des pertes de rendement lors des cycles de culture ultérieurs en repousse.

4.2. Un démarrage plus lent

Clements (1980) illustre dans son ouvrage à l'aide des dessins de Charles Bretz le principe du plus grand nombre de bourgeons disponibles en repousse qu'en canne plantée. Lors de la plantation d'une bouture de canne, le bourgeon donne naissance à une tige primaire constituée de plusieurs nœuds (n) et entrenœuds (in) empilés de façon serrée (Figure 19). À chaque nœud correspond un bourgeon (b) et un anneau radiculaire. C'est à partir de cet anneau radiculaire (rb) (Figure 19), que les primordia radiculaires se développeront pour former des racines (sr).



Légende :

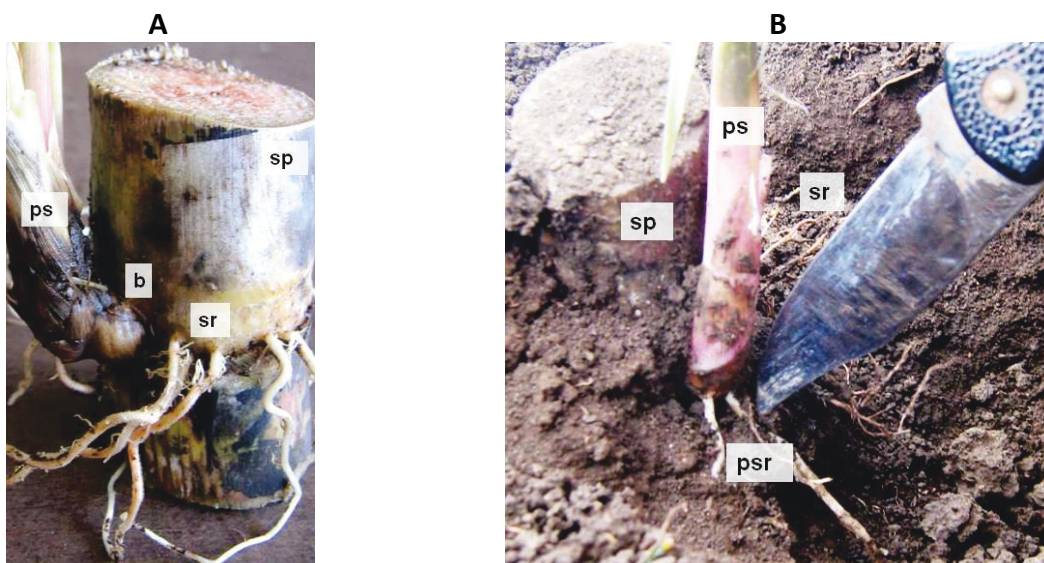
- | | |
|--|-------------------|
| sp : sett (bouture) | b: bud (bourgeon) |
| in : internode (entrenœud) | n : node (noeud) |
| sr : sett roots (racine de boutures) | |
| 1r : first ratoon shoot (tige de repousse) | |
| rb: root band (anneau radiculaire) | |
| pc : primary shoot (tige primaire) | |

Jeune pied de canne à sucre obtenu à partir d'une bouture d'un seul bourgeon plantée dans du sable puis déterrée et débarrassée de ses racines pour observer les bourgeons latents qui se développeront lors de la repousse.

Source : dessin de Charles Bretz (Clements, 1980)

Figure 19. Dessin d'une jeune pousse en canne plantée.

En canne plantée, la bouture doit dans un premier temps puiser dans ses réserves pour produire la tige primaire et les racines de bouture. À la base de la tige primaire de cette souche naissante, les racines de pousse vont se développer à partir des primordia de l'anneau radiculaire de tige (rb) (Photo 3). Ces racines de tige prennent alors le relai des racines de bouture pour l'alimentation du jeune plan de canne à sucre (Clements, 1980).



A : Les racines de la bouture (sr) sont émises en premier, (sp) bouture, (b) bourgeon de tige primaire, (ps) tige primaire. B : Les racines de tige (psr) apparaissent ensuite de la base de la tige primaire, elles prennent le relai des racines de bouture (sr - disposées le long de l'anneau radiculaire) pour alimenter le jeune plant, ici sur deux boutures d'un seul bourgeon.

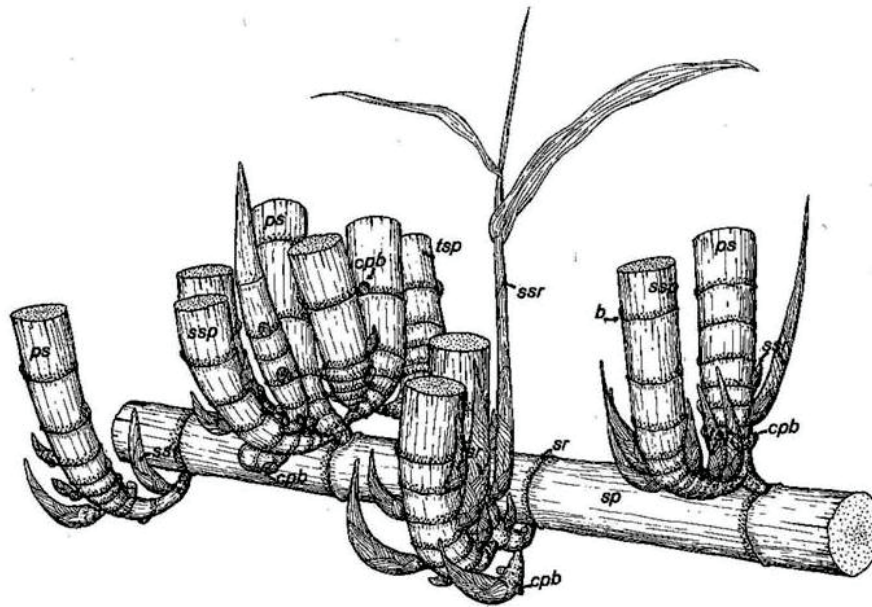
Source : clichés C. Poser

Photo 3. Enracinement de la bouture.

Chaque nœud formé, empilé à la base de chaque tige (primaire, secondaire) possède un bourgeon dormant, latent, potentiellement utilisable en repousse (1r) (Figure 19).

Pour la repousse, après la coupe de l'ensemble des tiges, la souche (ancienne bouture enracinée) bénéficie ainsi d'un nombre beaucoup plus important de bourgeons dormants que n'en possédait la bouture en plantation. La souche possède son propre système racinaire déjà bien ancré et qui

l'alimente. Elle peut de ce fait émettre en plus grand nombre et plus rapidement des tiges qui seront à la base de l'installation du couvert végétal (Figure 20).



Détournée après récolte en canne plantée, toutes les racines ont été enlevées pour plus de visibilité. Les tiges primaires (ps), issues des 4 bourgeons sont bien visibles, tout comme les tiges secondaires (ssp) qui à leur tour ont donné des pousses tertiaires (tsr). Quelques tiges secondaires en repousse (ssr) sont visibles ainsi que plusieurs bourgeons dormants (vb) d'autres sont en croissance (cpb).

Source : dessin de Charles Bretz (Clements, 1980)

Figure 20. Dessin d'une souche constituée d'une bouture de quatre bourgeons

L'installation du couvert végétal est plus lent en canne plantée qu'en repousse (Inman-Bamber, 1994). Thompson (1988) et Robertson (1996) confirment respectivement qu'en Afrique du sud et en Australie les dynamiques d'installation diffèrent et qu'en repousse c'est le nombre supérieur de bourgeons présents au niveau de la souche dans le sol, et leur proximité de la surface qui entraînent une apparition plus rapide et en plus grand nombre des tiges primaires. Pour Bezuidenhout (2003) la différence se produit bien dès le stade de levée débourrement des bourgeons au cours des 7 premiers jours suivant la plantation ou la repousse, le nombre plus grand de bourgeons et par conséquent de tiges primaires et plus particulièrement de tiges secondaires est à l'origine de la mise en place d'une couverture végétale complète plus rapide. Le retard dans l'installation du couvert végétal des cannes plantées est bien imputable au retard pris pour lever par les bourgeons de boutures plantées (Singels et al., 2005).

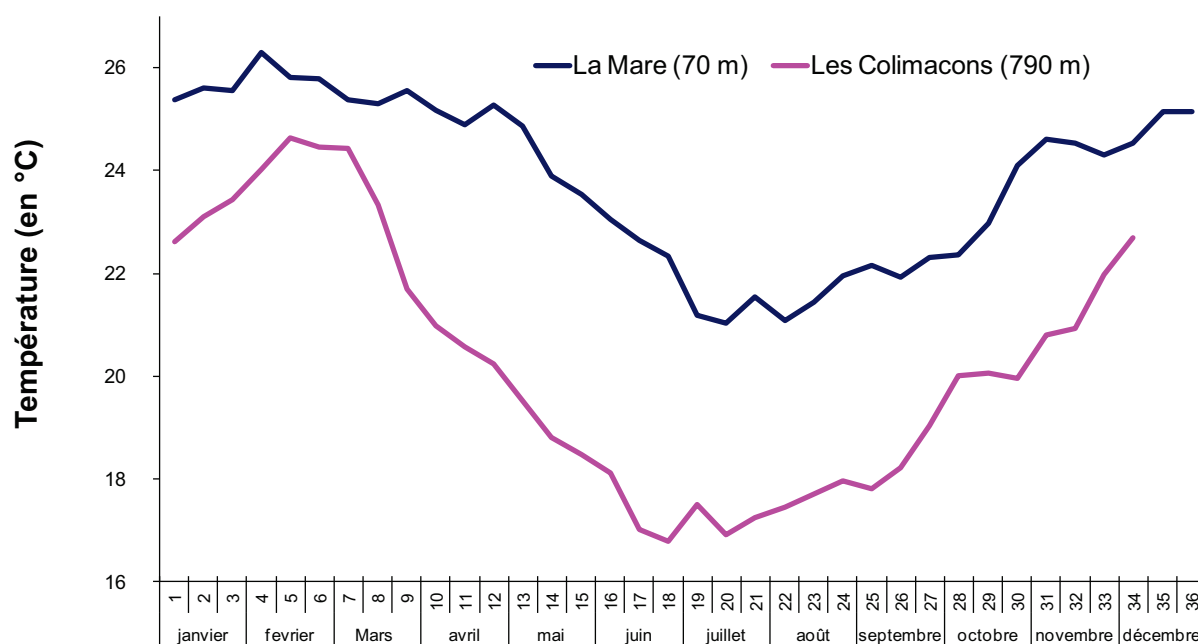
Cependant, dans les conditions hawaïennes de culture, satisfaisant les besoins hydriques, la différence de biomasse accumulée entre une canne à sucre plantée et une repousse s'estompe dans le temps (Evensen et al., 1997) et ne laisse pas apparaître de différence de rendement au moment de la récolte. En Australie, Robertson (1996) explique que dans le cas où la canne est cultivée dans un environnement où le plateau de production de biomasse est atteint avant la récolte, le démarrage plus rapide d'un cultivar ou plus tôt du cycle de plantation ne représente pas un gain à terme. Dans le cas des cultivars Q117 et Q138, en condition irriguée, le maximum de biomasse est atteint en plantation et en repousse, autour de 300 jours. Si durant les 100 premiers jours, l'accumulation de biomasse est plus rapide en repousse du fait des tiges plus nombreuses, à partir de 220 jours le retard est comblé du fait d'une efficacité de conversion radiative moindre en repousse.

A contrario, Au Brésil, Casagrande and Machado de Vasconcelos (2010) citent une étude sur l'effet de l'irrigation d'appoint sur deux variétés de cannes SP84-1431 et SP87-344 plantées et en repousse (Soares et al., 2004) dans laquelle les rendements finaux en canne à sucre plantées sont supérieurs à ceux en repousses. L'implantation en canne à sucre plantée est bien plus lente. Elle se traduit par une accumulation de biomasse plus faible au départ mais un rattrapage se produit durant la phase de croissance (Stade agronomique d'élongation de la tige - Cf. Figure 7 page 25). Ce rattrapage et le dépassement de production des cannes à sucre plantées sont constatés pour les conditions de l'essai situé dans le Goianésia (GO), vérifiés pour les deux variétés et les deux régimes hydriques (différence de près de 20 t/ha).

Si le phénomène de rattrapage relatif des biomasses accumulées au cours du temps entre canne plantées et repousses est relaté dans la littérature, il n'est pas observable dans toutes les conditions de culture.

4.3. Les Hauts, un milieu particulièrement stressant

La température a une influence majeure sur la mise en place du couvert végétal. Dans les Haut de la Réunion, elle est significativement plus fraîche que dans les Bas (Figure 21). Elle est tellement pénalisante lors de cette phase qu'elle ne permet pas à une canne à sucre, en année de plantation, de rattraper son retard dans l'accumulation de biomasse en comparaison avec celle accumulée sur une même durée par une canne en repousse.



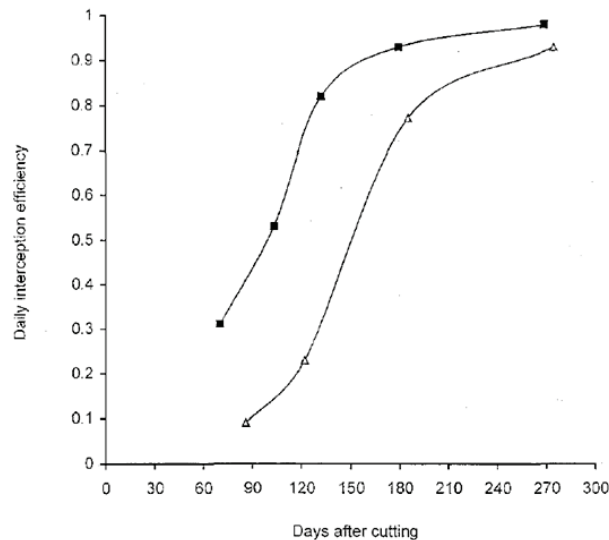
Source : propriété Cirad - Météo France

Figure 21. Moyenne décadaire des températures agricoles ((Min+Max)/2) du sol (2009-2011) pour les stations météorologiques des Colimaçons (790 m) et La Mare (70 m).

Martiné (1999) montre que la fermeture du couvert végétal est plus lente en altitude à La Réunion que dans Les Bas. Des mesures d'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)¹⁰

¹⁰ Le PAR désigne la gamme spectrale (bande de fréquence) du rayonnement solaire de 400 à 700 nanomètres qui est utile dans le processus de la photosynthèse.

qui permet d'estimer l'efficacité d'interception du couvert végétal (ϵ_i) ont été réalisées par Martiné et al. (1999). Alors que le stade de 80 % d'interception de rayonnement par le couvert végétal, utilisé dans la littérature comme référence (Singels et al., 2005) est atteint autour de 120 jours (Figure 22) après la plantation dans les Bas (zone littorale), il faut attendre près de 200 jours pour atteindre le même stade dans Les Hauts.

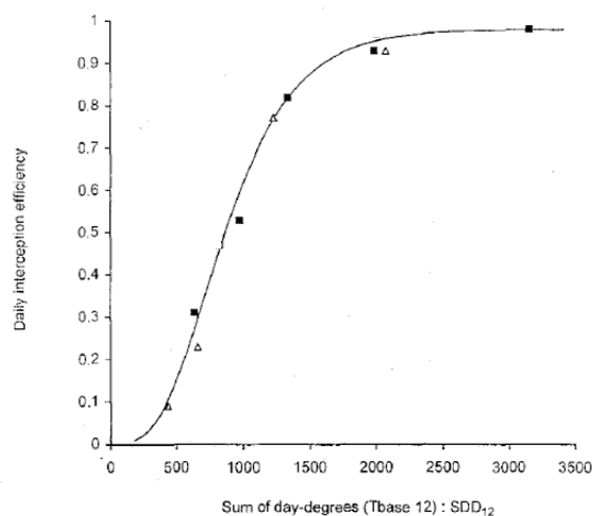


▲, Les Colimaçons – 790 m d'altitude ; ■, ligne paradis 50 m pour une canne à sucre de la variété R570.

Extrait de Martiné et al. (1999)

Figure 22. Évolutions des efficacités d'interception observées dans le temps (en jour après coupe)

Dans cette même étude Martiné et al. (1999), ne considérant plus le phénomène dans le temps mais sur une échelle d'accumulation de degré.jour au-dessus d'un seuil fixé à 12°C, démontrent que la température est le principale facteur explicatif de ce retard de croissance du feuillage (Figure 23). Les données des deux sites répondent à une fonction commune qui ne dépend que du paramètre température (somme de degré.jour au dessus d'une température seuil).

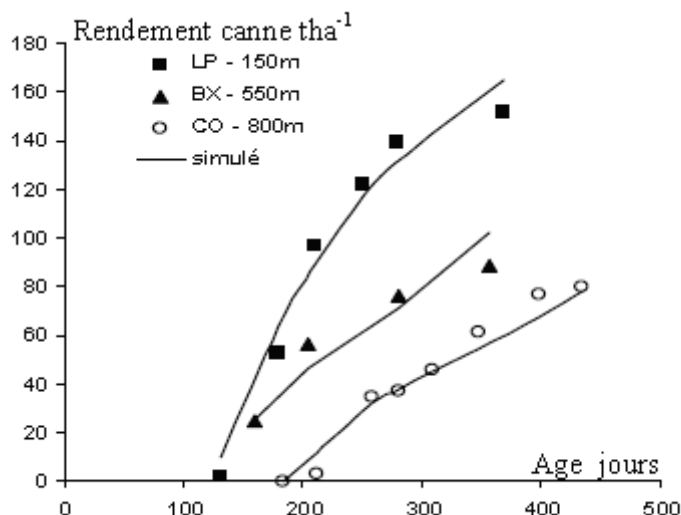


▲, Les Colimaçons – 790 m en altitude ; ■, ligne paradis 50 m pour une canne à sucre de la variété R570.

Extrait de Martiné et al. (1999)

Figure 23. Évolutions des efficacités d'interception observées dans le temps (en somme des degrés-jours $T_b = 12$)

Les données observées (Martiné and Todoroff, 2002) montrent dans ces conditions que c'est toute l'accumulation de biomasse qui est ainsi ralentie. Puisque 400 jours sont nécessaires à 800 m d'altitude pour obtenir un rendement de 60t/ha alors que la moitié (200 jours) est nécessaire à 550m et seulement 180 jours à 150 m. Le retard de croissance accumulé lors la phase d'installation de la plante n'est pas comblé (Figure 24).



Trois altitudes croissantes : Ligne Paradis (150 m), BX (550 m) et Les Colimaçons (790 m) et température décroissante.
Extrait de Martiné and Todoroff (2002)

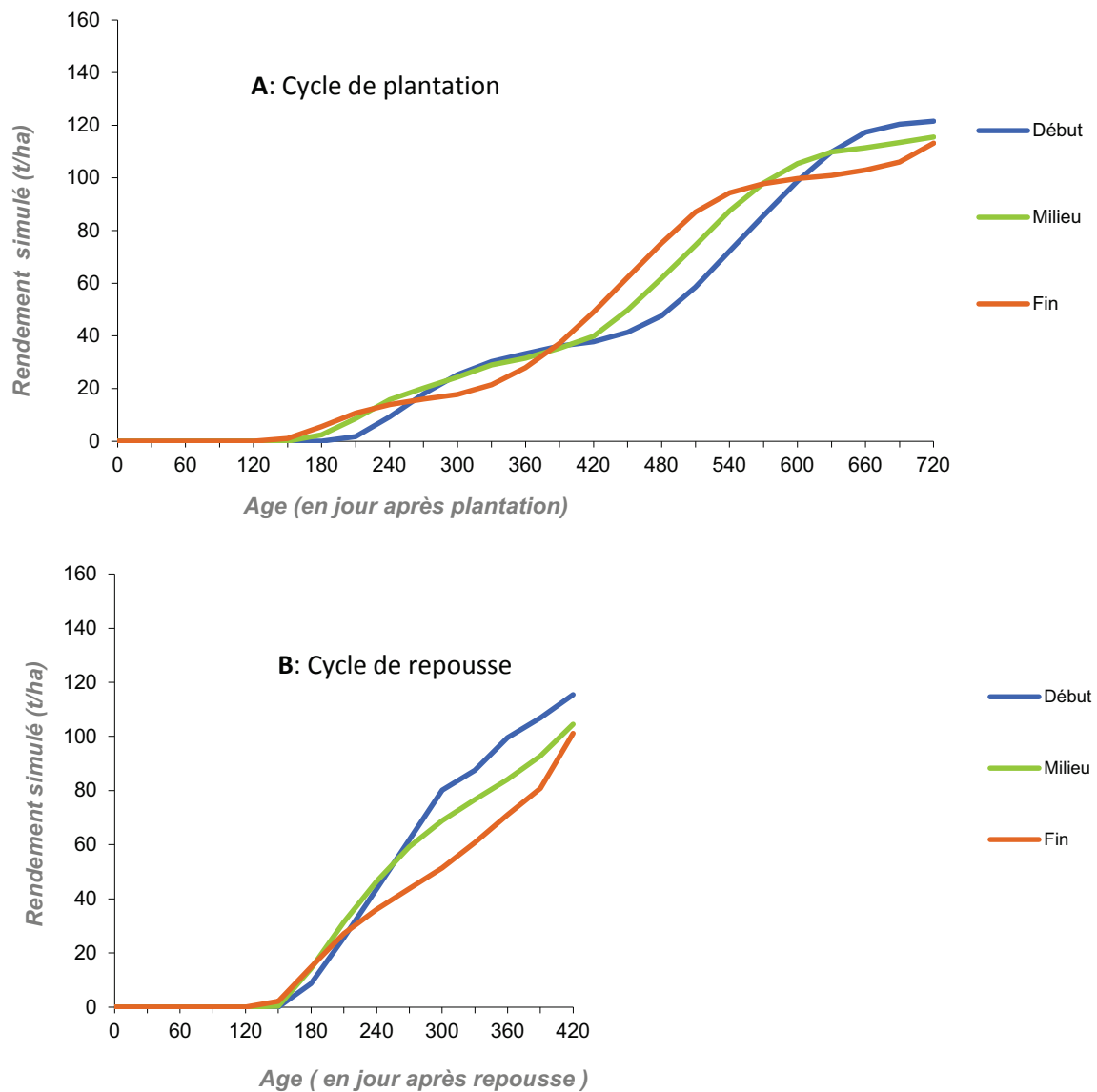
Figure 24. Rendements observés et simulés par le modèle « Mosicas » sur des parcelles de canne à sucre

Le modèle de croissance Mosicas¹¹ (version 2005 sur variété R 570) de J.F. Martiné (Martiné and Todoroff, 2002) intègre les données présentées. Ce modèle a été notamment utilisé pour une étude sur l'irrigation dans les Hauts de La Réunion. Pour cette étude, des simulations d'accumulations de biomasse au potentiel¹² ont été effectuées à l'aide des données recueillies sur la station météorologique du Plate à 840 m. Trois dates ont été choisies pour la plantation et en repousse de canne à sucre en conditions irriguées ou non (Vivet, 2005).

Les résultats des simulations pour les conditions irriguées sont présentés Figure 25. Le décalage du rendement simulé pour une culture en canne plantée par rapport à une canne en repousse illustre bien le retard dans l'installation du couvert de la canne plantée expliqué par les auteurs australiens et sud-africains. Le démarrage tardif dans l'accumulation de biomasse et la croissance plus lente en canne vierge sont observables. De plus, la croissance est ralentie durant la période durant laquelle les températures sont plus fraîches.

¹¹ Le modèle thermo-radiatif Mosicas dans sa version 2005 est du type « Big Leaf » à un seul compartiment sol. Le modèle converti du rayonnement en biomasse en faisant évoluer le couvert végétal en fonction des sommes de degrés jour accumulés quotidiennement au dessus d'une température seuil fixée. Pour la version en canne plantée, deux paramètres influant sur l'installation du couvert sont modifiés par rapport à une culture en repousse : le seuil (en degré jour) à partir duquel le couvert végétal devient actif est augmenté ainsi que la vitesse de croissance.

¹² Le modèle considère qu'il n'y a pas de manque, il ne tient pas compte d'attaques de bioagresseurs ou de la compétition avec les adventices.



Les simulations sont effectuées à l'aide du modèle Mosicas (Martiné and Todoroff, 2002). La production de biomasse de canne à sucre de la variété R570 est simulée à trois dates espacées de 60 jours (début : 01/08, milieu : 01/10 et fin : 01/12 pour les cannes plantées et 01/07, 01/09 et 01/11 pour les repousses) dans les Hauts de La Réunion (Données Météo Station La Plate Saint Leu 850 m) - (Vivet, 2005).

Figure 25. Évolutions respectives de l'accumulation de biomasse produite dans le temps à trois périodes (Début, Milieu et Fin) pour une canne A : en cycle de plantation et B, en cycle de repousse.

En l'absence de contrainte hydriques, les basses températures de l'air peuvent à elles seules faire chuter les rendements (Romero et al., 2005, Wood, 1991). Les basses températures, proches des seuils de fonctionnement de la plante constituent plus particulièrement un frein à l'installation du couvert. Gascho (1973) montre l'influence néfaste des températures extra-optimales (en-dessous de 20°C ou au-dessus de 35°C) particulièrement au moment de la plantation de la culture de la canne à sucre.

Clements (1980) écrit que les basses températures sont pénalisantes pour la levée. Au cours de ses travaux dans les années 1940 sur le nombre optimal d'entre-nœuds d'une bouture de canne à sucre

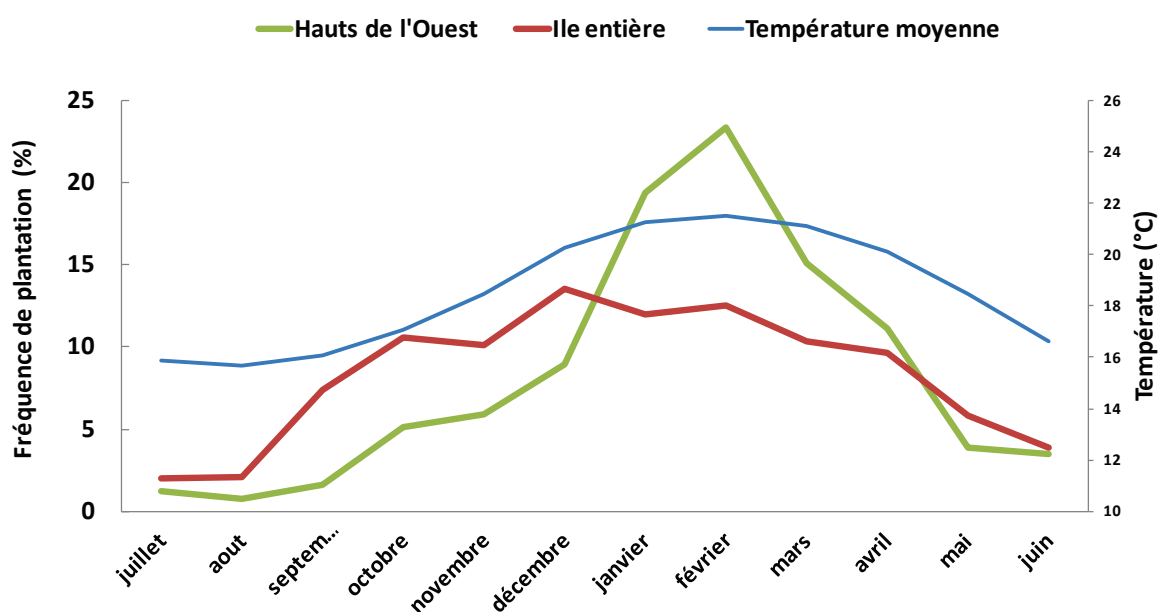
à planter, il démontre que la plantation de boutures de plus de 4 bourgeons est un gaspillage et précise que ces résultats sont obtenus en conditions satisfaisantes d'humidité et de qualité du substrat. Il ajoute que plus les températures sont basses plus la levée des bourgeons est lente et en faible proportion.

Ainsi, on peut supposer que le retard d'accumulation de biomasse de la canne plantée qui n'est pas comblé en conditions de culture dans les Hauts provient de la contrainte que représentent les basses températures.

En condition favorable, le fait qu'un clone obtienne de bonnes performances dans les premiers stades de culture en cycle de plantation n'est pas un gage de réussite sur l'ensemble du cycle de culture puisque dans certaines conditions défavorables de démarrage la culture peut rattraper le niveau de développement qu'elle aurait eu au potentiel. Par contre, en présence de contraintes, comme celles présentes dans les Hauts, une bonne implantation de culture constitue un préalable indispensable pour atteindre un niveau de production satisfaisant.

4.4. La stratégie des planteurs des Hauts à La Réunion

Les planteurs ont adapté leurs pratiques aux conditions des Hauts. Pour la date de plantation, les déclarations de plantation sur les 3 dernières années sur les Hauts de l'Ouest (Figure 26) montrent clairement une concentration de près de 3/4 des plantations entre les mois de décembre et avril avec une fréquence plus forte pour les mois de janvier et février qui totalisent plus de 40 % des plantations de l'année.



Moyennes de trois saisons de plantation 2009-10 à 2011-12 dans les Hauts de l'Ouest et sur l'ensemble de l'île de La Réunion et température moyenne de la station des Colimaçons (790 m).

Sources : Données de plantation du Service Relations Clients/SIG CTICS DAAF TEREOS Océan Indien
Données de températures : propriété Cirad - Météo France

Figure 26. Fréquence mensuelle des plantations

Actuellement la stratégie qui prévaut au choix de la période de plantation semble bien liée à la température car la courbe de fréquence de plantation des Hauts épouse celle de l'évolution des températures dans les Hauts (Figure 26) ainsi qu'à la probabilité d'occurrence d'épisode pluvieux (Figure 16 page 35). Si le manque d'eau à certaines périodes peut être solutionné par des

programmes d'aménagements, celui des températures basses est évidemment plus complexe à résoudre.

Une étude réalisée dans le cadre des recherches sur l'amélioration de la culture de la canne à sucre dans les Hauts de la Réunion (Programme CAS 3.1 Docup 2000) par le Cirad a fait l'objet d'une enquête auprès d'un réseau d'une trentaine de planteurs impliqués dans les tests variétaux du réseau eRcane (Roguet, 2010). Il en ressort que les planteurs s'attachent en priorité aux critères variétaux liés à l'installation de la culture de la canne à sucre dans leurs conditions contraignantes.

Avant tout, les planteurs attendent de nouvelles variétés adaptées à leur milieu de culture et répondant à leurs attentes. Outre les bonnes performances en termes de rendements en tonnage et teneur en sucres de la canne (17,2 %), les planteurs ont cité comme critère la capacité des variétés à couvrir le sol (10,9 %), à lever rapidement (10,6 %) ainsi qu'à émettre un grand nombre de talles (10,4 %). Il est à noter que ces 3 derniers critères correspondant à la faculté pour la plante de contrecarrer le développement concurrentiel des mauvaises herbes. Concernant la variété R583 dont ils étaient tous détenteurs dans le cadre des tests d'eRcane, ils lui reconnaissent à 69 % une « bonne levée » qu'ils qualifient de déterminante pour une adaptation aux contraintes des Hauts à 68 %. Ils imputent d'ailleurs à 78 % ces meilleures performances vis-à-vis des anciennes variétés à une meilleure réponse aux basses températures. S'il est vrai que la sélection variétale ne peut résoudre tous les maux face aux contraintes des Hauts, il n'en demeure pas légitime et pertinent que les planteurs souhaitent accéder à des variétés mieux adaptées à leurs conditions de culture.

Dans la mesure où le basculement des eaux et l'accès à des bassins de rétention collinaires pourront, en partie libérer les agriculteurs de la contrainte de planter au moment des pluies les plus probables, **le cadre de notre étude se limite à la problématique liée à la température.**

4.5. Questions de recherche et démarche expérimentale

On ne trouve finalement que peu de travaux récents sur les effets des températures basses sur l'implantation de la canne à sucre en cycle de plantation. Les repousses étant plus nombreuses que les plantations (5 à 15 en Afrique du Sud), les premiers stades d'installation du couvert en canne plantée n'ont logiquement pas été étudiés de façon prioritaire (Inman-Bamber, 1994). Aussi, l'implantation des cultures en cycle de plantation ne posait jusqu'à présent pas de problème dans la mesure où la canne était plantée dans des environnements plutôt favorables, sans contrainte thermique.

Cependant, certaines études traitent plus récemment des modifications de température du sol selon les pratiques de gestion des résidus de récolte (Viator et al., 2009) et leurs effets sur les récoltes suivantes (Viator et al., 2005). Les auteurs notent bien une modification de la température du sol : 1,5 C° en moyenne plus fraîche durant les processus de levée et de tallage lorsque les résidus sont conservés comparativement à la pratique du brûlage¹³ (Morandini et al., 2005) et entre 0,8°C plus fraîche et 1,3°C plus chaude, dépendant de la saison lorsque le paillis est conservé comparativement à une situation où les résidus seraient exportés du champ (Viator et al., 2005). Des effets de ces

¹³ Pour des raisons environnementales, la pratique du brûlage, au moment de la récolte, est abandonnée. Ce brûlage permettait principalement d'augmenter l'efficacité de coupe. Le non brûlage des champs avant ou après récolte permet de conserver les feuilles sèches tombées au sol, celles encore liées à la tige sont laissées au champ et constitue alors un paillis.

modifications thermiques existent bien sur le développement de la plante lors de l'implantation mais ils ne sont évidemment décrits qu'en condition de repousses (van Antwerpen et al., 2006).

À La Réunion, la pression foncière qui s'exerce sur les terres à canne des Bas et qui encourage les cultures à se développer sur les zones plus fraîches d'altitude, rend le sujet pertinent. Notre étude consiste, pour ce milieu des Hauts, à expliquer le meilleur fonctionnement de variétés plus adaptées, présentes depuis peu à des conditions de culture en altitude tropicale.

La question d'origine qui se pose est relative à l'influence de températures fraîches sur la culture de la canne à sucre sur les cannes des Hauts mais elle renvoie à des questions plus générales :

- Quels processus sont pénalisés par des conditions de culture de la canne à sucre en températures fraîches ?
- A quels stades l'effet de la température basse est-il le plus marqué ?
- Comment caractériser l'effet des températures basses pour comparer des comportements entre lieux ou entre variétés ?
- Pourquoi certaines variétés sont-elles mieux adaptées ?

Pour traiter ces questions, il faut être capable de caractériser l'effet de la température sur le développement (ou phénologie) de la culture. **Dans le cadre de notre étude, nous considérons uniquement l'implantation de la culture en cycle de plantation correspondant, à une phase depuis la mise en terre des boutures jusqu'à la fermeture du couvert végétal**, stade où le couvert a atteint un indice foliaire qui permet de capter une très grande proportion du rayonnement disponible, définie par convention au dessus de 70 % (Inman-Bamber, 1994). Plusieurs processus biophysiques sont mis en jeu durant cette période, les effets de la température sur les différents événements ou moments phénologiques de l'implantation seront recherchés :

- Lors du débourrement-levée, nommé « débourrement » qui correspond à la levée de dormance qui se décompose en une phase de latence, puis gonflement et allongement du bourgeon jusqu'à sa levée,
- Lors de l'émission de tiges et lors de l'émission de feuilles, sur l'évolution de la surface foliaire et celle de l'interception du rayonnement par le couvert végétal.

En pratique, nous étudions dans un **premier temps le processus de débourrement-levée** des bourgeons qui correspond par abus de langage à la « germination » qui a lieu en cycle de plantation et en cycle de repousse et dans un **deuxième temps les processus ultérieurs d'émission de feuilles et de talles**.

La question est donc traitée par l'étude de l'effet de la température sur les processus en jeu avec un accent particulier dans ce travail sur le débourrement. Pour ce faire, nous étudions à diverses températures les différences de comportement entre variétés. Pour mener à bien cette étude, il faut des expérimentations à différentes températures, donc en chambres climatiques (climat contrôlé), en serres ou en conditions naturelles à plusieurs altitudes (Martiné et al., 1999).

Notre étude traite de lots boutures aux individus non identiques comme peuvent être composés des lots de graines (Moreau-Valancogne et al., 2008), des lots de bourgeons floraux axillaires de maïs (Ruget and Duburcq, 1983), des lots de bourgeons d'arbres fruitiers ou encore des lots de fleurs de kiwi (Lescourret et al., 1999). L'évènement étudié, principalement le débourrement, ne se produit pas de façon simultanée pour tous les individus de la population. Il est donc nécessaire d'étudier la dynamique de débourrement de l'ensemble des individus. Le long d'une tige de graminées ou d'autres plantes, les boutures peuvent avoir des aptitudes différentes (Le Bris et al., 1998). Après avoir confirmé que c'est aussi les cas pour les tiges-mère de canne à sucre, nous tenterons, si possible, de sélectionner des lots de bourgeons à aptitudes semblables.

Ainsi émerge une question préliminaire d'ordre méthodologique : **la position d'origine du bourgeon a-t-elle une influence sur sa capacité à débourrer ? Comment choisir des bourgeons ayant des aptitudes les plus semblables possible ?**

Notre hypothèse repose sur le fait que la position d'origine du bourgeon sur la tige peut avoir une influence sur le débourrement et qu'une sélection limite les différences de comportement.

Ensuite, nous sommes logiquement prêts à répondre à la question de **l'effet de la température sur le débourrement d'une population de boutures**, premier temps de notre étude.

Si le déroulement du processus est fonction de la température, quel peut-être le mode d'action de la température ?

Notre hypothèse se base alors sur le fait de considérer le phénomène comme pouvant être ajusté par une logistique sur sa partie linéaire. La durée en jours peut ainsi être remplacée par une somme de températures (en degré.jour avec une température seuil). Les limites de cette hypothèse sont connues (Cf. Chap III - 2.2. page 82), elle ne vérifie que dans une certaine gamme de températures puisque, globalement, les effets de la température sont schématisés par des courbes en cloche (Bonhomme, 2000, Lehenbauer, 1914) maintenant mises en équation par exemple par des courbes bêta (Yin and Kropff, 1996). Les données collectées sont quotidiennes et en condition de températures contrôlées. Nous nous attachons à montrer l'effet de la température en recherchant les paramètres des modèles.

Existe-t-il des différences variétales, c'est-à-dire des variétés présentant de meilleures aptitudes ?

Nous comparons donc les variétés, en nous appuyant sur les paramètres de leur modèles respectifs (jusqu'à 5 paramètres par variétés). Un des paramètres correspond à la température seuil. A condition que cette dernière soit significativement différente d'une variété à une autre et que les autres paramètres ne soient pas différents entre les variétés, la température seuil illustre alors à elle seule une adaptation thermique.

Les modèles étant obtenus à partir d'expérimentation à température constante, nous souhaitons les confronter à des conditions plus proches de la réalité en température fluctuantes. Une série d'essais sont menés et analysés dans deux nouveaux environnements : en serre puis au champ. Après cette tentative de validation nous nous interrogeons sur l'incidence des processus ultérieurs.

Dans le deuxième temps de notre étude, les processus post-débourrement, liés à l'installation du couvert végétal sont étudiés.

Durant les phases qui suivent le débourrement, des facteurs autres que la température entrent en jeu. Ils sont d'ordre climatiques comme l'eau et le rayonnement (Tableau 1 page 26) ou d'ordre agronomiques comme la concurrence avec les adventices, les pressions parasitaires ou encore l'alimentation azotée... Partant du principe que ces contraintes sont évitées par des conditions de culture appropriées nous répondrons aux questions suivantes :

- Apparition des feuilles et des tiges sont-ils des processus particulièrement contraints, pénalisés par les basses températures ?

- Si des variétés s'illustrent par un débourrement plus rapide, possèdent-elles de meilleures capacités lors des processus liés à l'émission et l'allongement des feuilles et des tiges ? Ces variétés conservent-elles l'avance éventuellement acquise pendant la levée ?

La question de fond étant finalement d'appréhender les limites géographiques des nouvelles variétés, adaptées aux conditions plus fraîches des Hauts de la Réunion ce travail de thèse traitera d'adaptation géographique. Pour ce dernier aspect les questions suivantes seront traitées :

- Comment peut-on définir des zones géographiques d'adaptation ?

- Quelles zones seront déclarées favorables à la culture des variétés de canne moins sensibles au froid ?

Ainsi, dans le dernier chapitre de discussion, les résultats biophysiques seront valorisés par une extrapolation géographique. Notre objectif est d'extraire, à partir des modèles obtenus les paramètres permettant de définir des zones climatiques d'adaptation, de potentiel. Les modèles contribuent à faire progresser la connaissance en conceptualisant des phénomènes. En agriculture, ils permettent de reconstituer ou bien de simuler des scénarios à partir de données bioclimatiques réelles ou fictives. A partir de données météorologiques collectées sur les Hauts de la Réunion, les capacités d'adaptation de variétés identifiées comme mieux adaptées à des conditions plus fraîches de culture seront simulées. Comme dans les études agro-météorologiques les durées en somme de température pour atteindre un stade seront calculées. Les résultats seront présentés sous forme de cartes.

Résumé du chapitre I

Contexte et état de l'art

Constat

- Le marché mondial du sucre est en expansion (+ 2,3 % par an) et les débouchés plus nombreux.
- Des surfaces supplémentaires sont donc nécessaires pour répondre à l'augmentation des besoins.
- Les ressources en terre étant limitées, les cultures s'orientent vers des terrains moins adaptés, que nous nommerons "sous contraintes", notamment à plus haute altitude ou plus grande latitude, dans différents pays du monde.
- La Réunion possède de tels terrains en altitude, qui sont mobilisables.
- Depuis peu, sont apparues des variétés mieux adaptées au climat plus frais des Hauts, où elles sont déjà cultivées.

Questions écophysiologiques, agronomiques et géographiques de la thèse

- Quel est l'effet des basses températures sur la culture de la canne à sucre ? C'est-à-dire par quels processus et facteurs passent les "contraintes" observées sur le terrain en altitude, conduisant à une moindre croissance ou empêchant le développement du couvert ?
- A quels stades l'effet de la température basse est-il visible ou le plus marqué ?
- Comment caractériser ces effets pour pouvoir comparer des comportements entre lieux et entre variétés ?
- Pourquoi certaines variétés sont-elles mieux adaptées ?
- Comment peut-on définir des zones géographiques d'adaptation ?
- Quelles zones seront déclarées favorables à la culture des variétés de canne moins sensibles au froid ?

Hypothèses

- Il existe une modulation de l'effet de la température selon les variétés : il faut chercher à la mettre en évidence et la quantifier.

Méthode

La culture de la canne à sucre se résume en un cycle de plantation et plusieurs cycles de repousses. Les étapes qui composent les deux cycles sont similaires avec une phase de débourrement des bourgeons souterrains, conduisant à la levée, puis une phase d'installation du couvert, comprenant la mise en place des feuilles et des tiges (avec une large part liée au tallage, particulièrement important en canne à sucre). L'implantation de la culture a lieu en cycle de plantation et en cycle de repousse, elle débute depuis la levée des bourgeons mis en terre pour le premier ou depuis la reprise de la souche volumineuse et enracinée pour la seconde jusqu'à la fermeture du couvert végétal c'est-à-dire le stade où le feuillage ne laisse pratiquement plus passer de rayonnement photosynthétique. Lors du cycle de plantation, le démarrage de la culture à partir de bourgeons de tige-mère découpées en boutures est particulièrement lent. Le morceau de tige doit développer tiges, feuilles et racines pour devenir autonome.

Résultat de l'analyse de l'élaboration du rendement de la canne à sucre

L'implantation en cycle de plantation est identifiée comme une étape très importante pour les cultures de canne, et pour la culture dans les Hauts en particulier, car elle conditionne non seulement la date de première récolte et son niveau mais elle a un impact sur le cycle de repousse. L'analyse de l'effet de la température pour chacune des étapes de l'implantation constitue le fil conducteur de la thèse.

Chapitre II : Aptitude au débourrement - qualité du matériel végétal

Ce chapitre a fait l'objet d'une collaboration étroite avec Françoise Ruget et Frédéric Chiroleu en vue de la production d'un article dans la revue South African Journal of Botany.

L'article pourrait s'intituler :

« *Effects of Topophysis on bud burst of single bud cuttings of sugarcane (Saccharum officinarum L.)* »

1. Introduction

Une hiérarchie existe entre les bourgeons d'une même tige, elle régit l'ordre dans lequel les bourgeons, selon leur position le long de la tige vont se développer. La question de l'établissement et de l'origine de cette hiérarchie entre bourgeons a été abordée depuis longtemps à l'aide d'observations de développement de bourgeons de divers âges, dans diverses conditions ainsi que par l'étude des facteurs biochimiques en cause. Les travaux ont porté sur le développement relatif de différents bourgeons pilotant l'architecture de la plante : Novoplansky (1996, 2003) sur pois, montre l'importance de la vitesse de croissance sur l'établissement de la hiérarchie entre bourgeons, Lauri et al (2010), montrent l'influence de la position de la branche sur pommier. Ces travaux ont aussi porté sur le développement de bourgeons isolés, c'est-à-dire libérés de la dominance apicale, comme c'est le cas pour les boutures.

En effet, même détachés de la plante mère, les bourgeons gardent une "mémoire" de leur position sur la plante dont ils sont issus, cette mémoire a fait l'objet de nombreuses études, en particulier sur le rosier, où les auteurs (Bredmose and Hansen, 1996, Le Bris et al., 1998, Marcelis-Van Acker, 1994, Zalewska et al., 2010) emploient le mot de topophysie (Molish, 1916) pour désigner l'effet de l'origine du bourgeon sur ses propriétés. Ces travaux ont porté sur la caractérisation et l'origine des différences entre bourgeons. Nous emploierons aussi le terme de topophysie pour mettre en valeur l'aspect botanique de notre étude.

Sur la canne à sucre, aucune étude à notre connaissance n'a été publiée sur les aptitudes au débourrement des bourgeons selon leur position d'origine depuis les travaux descriptifs de Van Dillewijn (1952) et de Clements et Nakata (1965). Très récemment, Smit (2011) sur une étude relatant les effets de la température, de l'humidité du sol et de la fertilisation sur la levée précise qu'il utilise uniquement les bourgeons issus de la partie centrale de la tige-mère tandis que Singh et Srivastava (1975) pour une étude de l'impact du potentiel osmotique du sol n'utilisent que les boutures issues de la moitié supérieure des tiges.

Pourtant il serait intéressant de savoir s'il est possible de réaliser autant de boutures que de bourgeons sont présents sur la tige car des pratiques de boutures à un seul bourgeon se développent actuellement dans plusieurs pays du monde sous forme de transplantations de boutures déjà levées (Caro canne, Novembre 2008, Guimarães de Andrade Landell et al., 2012) ou en plantation directement dans le sol de boutures traitées (Plene®) (Martinho et al., 2010). De leur côté, en plantation manuelle, les agriculteurs de la Réunion déposent en terre traditionnellement des

tronçons de 3 à 5 bourgeons, car le matériel végétal est abondant (Clements, 1980). Ils n'éliminent que la partie sommitale de la tige, trop jeune, non lignifiée et parfois la partie basale. L'étude des aptitudes et des temps de débourrement de tous les bourgeons pris individuellement et séparés de la tige-mère nous permettra de savoir si la position d'origine du bourgeon est un facteur de différence. Cette étude implique aussi de s'intéresser à la dimension de la bouture et à sa teneur en sucres, qui sont de possibles facteurs limitants du débourrement.

Dans le cadre de notre travail de thèse, cette question a d'autant plus d'acuité que nous avons besoin de lots de boutures parfaitement homogènes pour étudier l'effet de la température sur des lots de bourgeons de différentes variétés.

Les réponses à cette question pourraient avoir deux implications : (i) améliorer la pratique de multiplication des boutures à un seul bourgeon en pépinière lors des premiers stades de diffusion d'une nouvelle variété lorsque que le matériel végétal est encore peu abondant, (ii) favoriser la replantation et combler les manques ou les nouvelles plantations sur des terrains dévolus à la canne à sucre (Guimarães de Andrade Landell et al., 2012).

Nous avons testé les boutures courtes et longues, en regard de la pratique expérimentale et certaines pratiques agricoles, où les entre-nœuds sont généralement coupés à une longueur fixe (15 cm pour Clements et Nakata (1965), 8 cm pour Smit (2011), 5 cm au dessous du bourgeon pour Singh et Srivastava (1975)) pour faciliter l'installation des boutures, généralement placées verticalement pour des raisons pratiques d'économie d'espace.

2. Matériel et méthode

2.1. Types d'essais et matériel végétal

Deux essais ont été réalisés pour étudier les proportions et vitesses de débourrement de bourgeons en fonction de la température et de la variété (essai 1), et en fonction de la longueur de la bouture (essai 2).

Les tiges des cannes mères des trois variétés (R570, R577 et R583) proviennent de boutures d'un seul bourgeon levées en serre et transplantées à l'âge d'un mois à la station expérimentale de La Mare (20°54'S, 55°31'E, 70 m d'altitude). Le sol est de type nitisol dystric [27 FAO 2007] et les essais ont été conduits en condition de ressources hydriques et azotées non limitantes.

Les boutures utilisées sont des tronçons de tige à un seul bourgeon. Un traitement fongicide a été réalisé par trempage au Mancozèbe (80%) pendant 30 minutes dans un mélange concentré à 2 g/l d'eau. Le substrat de plantation des boutures est composé d'un tiers de terre, d'un tiers de podzol et d'un tiers de terreau.

2.1.1. Essai 1 (Tableau 2)

Vingt tiges provenant de chacune des 2 variétés étudiées (R570 et R583) sont récoltées à 9 mois après plantation et découpées en tronçons de 8 cm de long (4 cm long de part et d'autre de chaque bourgeon). Les bourgeons issus de 10 de 20 tiges de chaque variété sont répartis dans une première chambre climatique à 18°C (17.9°C +/- 0.8°C) et les bourgeons provenant des 10 tiges restantes dans une seconde chambre climatique à 24°C (23.7°C +/- 0.8°C).

2.1.2. Essai 2 (Tableau 2)

Dix tiges de chacune des variétés R570, R577 et R583 sont récoltées à 11 mois après plantation. Cinq des 10 tiges sont découpées de part et d'autre de chaque bourgeon, au milieu de l'entre-nœud. Pour les 5 tiges restantes, seul un tronçon de 8cm (4 cm de part et d'autre de chaque bourgeon) correspondant à des boutures dites «raccourcies» est conservé. Les boutures ainsi obtenues sont ensuite réparties aléatoirement dans une serre en verre (25.3 °C +/- 3.1 °C - Figure 34 page 88). On nommera "raccourcies" ces boutures de 8 cm de long.

Tableau 2. Essais 1 et 2 : Protocole résumé des sur canne à sucre en boutures à un seul bourgeon

	Variété	Date de plantation	Condition	Traitement	Durée (jour)	Effectifs*
Essai 1	R570	11/02/2009	Chambres climatiques	18°C (17.9°C +/- 0.8°C)	24	Initial : 769
	R583			24°C (23.7°C +/- 0.8°C)	47	Final : 675 (dont milieu : 460)
	R570					Initial : 719
Essai 2	R577	07/04/2009	Serre	Raccourcis / Non raccourcis	34	Final : 536
	R583			(25.3 °C +/- 3.1 °C)		(dont milieu : 432)

* Les effectifs finaux sont obtenus après élimination des boutures qualifiées de non saines avant ou après expérimentation.

2.2. Conditions expérimentales de chaque essai

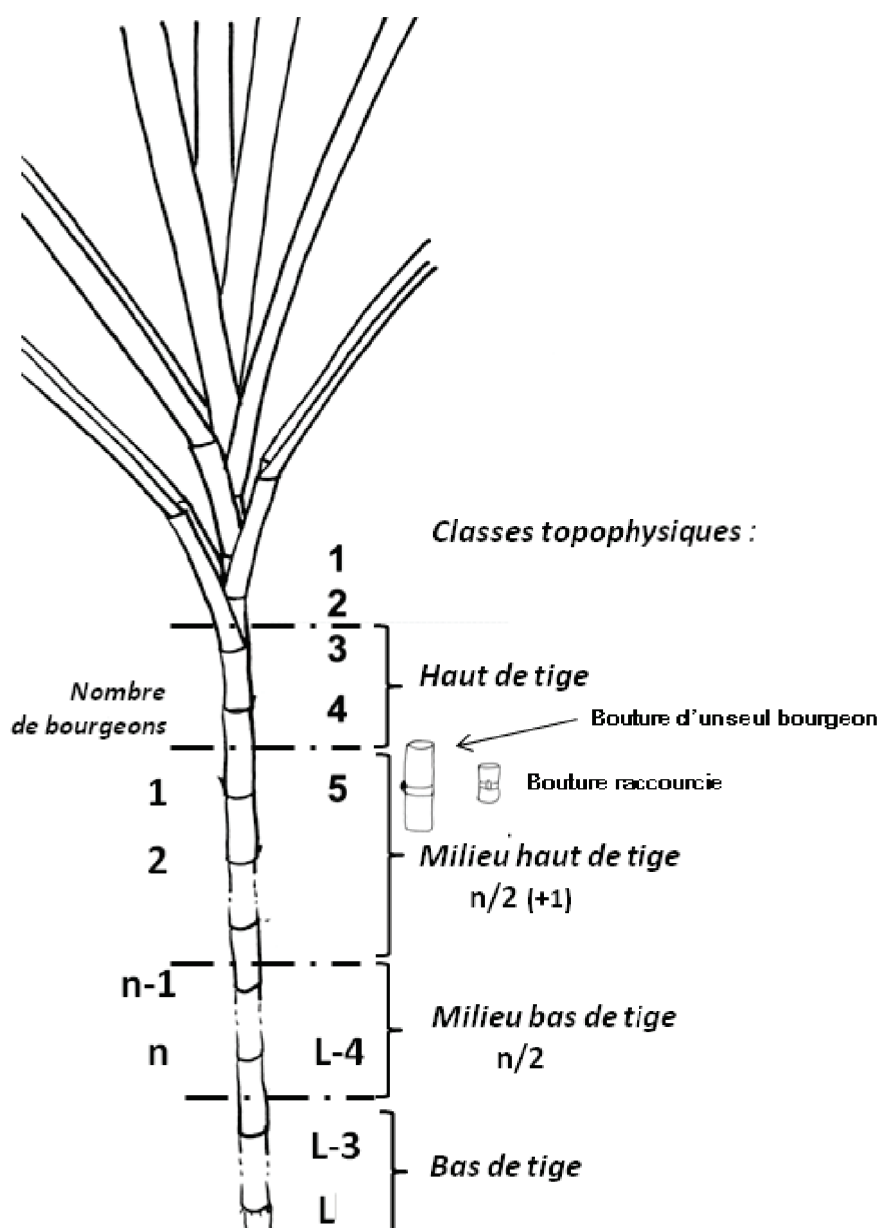
Dans l'essai 1, les boutures sont plantées à la verticale en pots individuels (Photo 4 page 63). Après arrosage et ressuyage de la terre, les pots sont regroupés par 24 dans des barquettes. Afin de conserver une teneur en eau constante, un pot de chaque barquette est pesé en début d'essai. La référence obtenue sera utilisée pour arroser à poids constant l'ensemble des pots de la barquette tous les 5 jours avec une eau préalablement mise à température. Les chambres climatiques de l'essai 1 sont constituées de deux modules de chambres froides positives de marque Dagard, de 15 m³ chacune, avec un groupe froid Technobloc et une régulation de chauffe en tout ou rien additionnelle de 1 kW. Les durées d'expérimentation furent de 24 jours à 24 °C et de 47 jours à 18 °C. Seule la tige n° 5 du traitement R570 à 18°C a été retirée des effectifs car la proportion de ses bourgeons ayant levé était anormalement faible (un seul bourgeon levé sur 14).

Dans l'essai 2, du fait de la longueur des boutures non raccourcies, les boutures sont plantées à l'horizontale, bourgeon sur le côté, en barquettes. Un arrosage effectué 4 fois par jour garantit les conditions optimales d'humidité pour la levée des bourgeons. Le jour, une brumisation est déclenchée de jour à 4 reprises (toute les 4 heures à compter de 7h du matin) dans la serre, lissant ainsi les pics éventuels de température. L'expérimentation a duré 34 jours.

2.2.1. Mesures avant mise en condition de levée

Avant la découpe en boutures (Figure 27), les bourgeons sont identifiés selon leur position le long de la tige (topophysie). Ne sont retenus que les bourgeons qui sont à l'aisselle de feuilles adultes, c'est-à-dire de feuilles qui ont fini leur croissance (ochréa ou ligule visible à la base de la gaine (Terminal Visible Dewlap (TVD), Kuijper (1914) cité par Van Dillewijn (1952)). Par convention, le numéro 1 est attribué au bourgeon à l'aisselle de la feuille adulte la plus haute (feuille TVD). Cette méthode a

l'intérêt de ne pas faire dépendre la numérotation de la plus ou moins bonne conservation des feuilles de la base de la tige : elle attribue le plus petit numéro au bourgeon le plus jeune.



Depuis le plus jeune (1), à la base de la feuille adulte la plus haute jusqu'au plus vieux (L=lowest bud), au bas de la tige. Des portions de tige, (entière ou raccourcies) sont utilisées comme boutures.

dessin de F. Ruget

Figure 27. Numérotation des bourgeons,

Des observations sur l'état sanitaire de chaque bourgeon sont effectuées sur la totalité des boutures avant la mise en pot et sur les boutures n'ayant pas levées à l'issue des deux essais. Les bourgeons et boutures abimés ou piqués sont retirés des effectifs initiaux (Tableau 2). Le foreur ponctué, *Chilo sacchariphagus* (*Lepidoptera: Crambidae*) est un insecte foreur de tige qui peut être à l'origine de dégâts importants particulièrement à La Réunion (Goebel, 1999) selon le niveau de résistance des variétés.

Avant la mise en pot des boutures, une goutte de jus est extraite à l'aide d'une pince au niveau de la section inférieure de la bouture¹⁴. La mesure du pourcentage de matière sèche soluble (Brix) est effectuée au réfractomètre pour chaque goutte de jus. Comme la matière sèche soluble est principalement composée de saccharose, la mesure du Brix (en g pour 100 g de jus) dans la suite du texte est considérée comme la mesure de la teneur en sucres totaux.

2.2.2. Observations pendant le débourrement

Pendant la période de levée, les observations sont effectuées chaque jour. Seules les pousses mesurant plus de 1 cm sont notées et considérées comme ayant levé. Ces observations donnent la durée de débourrement de chaque bourgeon.

Les températures sont relevées en continu dans la terre au niveau des boutures et enregistrées à l'aide d'une centrale d'acquisition de marque Campbell.

2.2.3. Fin de l'expérimentation et mesures :

L'expérience s'achève lorsqu'on n'a plus observé de levée durant 10 jours successifs. Les bourgeons qui n'ont pas levé sont disséqués afin d'identifier d'éventuelles causes de non-levée (malformations, dégâts physiques, attaques parasitaires).

Dans l'essai 1, les racines de chaque bouture sont isolées de celle ci, nettoyées et placées individuellement à l'étuve (75°C durant 72 heures). Le poids sec de racines est mesuré à l'aide d'une balance de laboratoire Sartorius LC 1200S à 1.10^{-3} g de précision (échelon 0.02 g.). Certains anneaux radiculaires possédaient déjà, au moment de la plantation, des racines développées qui ont été conservées.

2.3. Variables étudiées

Le débourrement est analysé selon trois variables utilisées par Larsen et Bibby (2004) pour des levées de semences : le taux de levée BBP (Bud Burst Percentage), la durée moyenne de la levée BBT (Bud Burst Time) et la dispersion du débourrement (Θ_{25-75}).

Le BBP est la proportion finale de bourgeons levés à la fin de chaque expérimentation. La BBT est la durée moyenne nécessaire en jour entre la mise en pot de la bouture et l'apparition d'une pousse d'une longueur de plus de 1 cm, elle est calculée comme la moyenne des durées observées. Ces 2 variables seront nommées "propriétés de débourrement". La dispersion du débourrement Θ_{25-75} calculée comme la durée séparant les levées d'au moins 25 % et 75 % de la population de bourgeons (par rapport aux boutures levées), caractérise l'homogénéité de la population autour de sa durée moyenne de débourrement.

Dans un premier temps, les proportions de débourrement et les durées ont été analysées individuellement. Le comportement peu régulier de levée des boutures et les effectifs relativement faibles par position ont conduit à grouper les bourgeons par zone d'origine sur la tige, c'est-à-dire en 4 classes topophysiques : bas de tige, milieu bas, milieu haut et haut de tige (Figure 27).

¹⁴ Certaines boutures, trop fragiles n'ont pas été mesurées.

2.4. Traitement de données et analyses statistiques

Toutes les analyses portent sur des tiges considérées comme des individus et l'appartenance à une tige est considérée comme un effet aléatoire (corrélation supposée forte entre bourgeons d'une même tige).

Pour l'ensemble des analyses, les effets significatifs sont mis en évidence par un test de rapport de vraisemblance sur modèles emboîtés. Les comparaisons de moyennes multiples sont réalisées par un test basé sur l'approche de Tukey (Hothorn et al., 2008). Les tests sont réalisés au seuil de 5%. Pour les modèles linéaires, en cas d'hétéroscédasticité¹⁵, une transformation de variables a été réalisée.

2.4.1. Effet du raccourcissement de la bouture sur les propriétés de débourrement (essai 2)

Pour l'analyse portant sur l'essai 2, seuls les bourgeons de la partie centrale de la tige (milieu bas et milieu haut) sont étudiés car les bourgeons du haut et du bas de tige ont parfois des longueurs inférieures à 8 cm et ne peuvent être raccourcis. Un modèle linéaire généralisé mixte est utilisé pour rechercher les effets et les interactions entre variété (R570, R577 et R583) et longueur de la bouture (raccourcie ou non raccourcie) sur chacune des propriétés de débourrement, ces effets étant considérés comme fixes et prenant en compte les interactions.

2.4.2. Propriétés de débourrement pour l'ensemble des bourgeons, quelle que soit leur position (essais 1 et 2)

Dans les deux essais pris séparément, l'analyse porte sur l'ensemble des bourgeons. Les effets de la classe topophysique (bas, milieu bas, milieu haut, haut de tige pour l'essai 1, et milieu bas et milieu haut de tige pour l'essai 2), de la variété et de la température (essai 1) et de leur interactions sont testés sur les variations de taux de levée (BBP) et de durée moyenne de levée (BBT). Les valeurs moyennes de BBP et BBT sont comparées respectivement au sein de chaque essai à l'aide d'un modèle linéaire généralisé mixte et d'un modèle linéaire mixte avec comme effet fixe les effets susnommés.

2.4.3. Propriétés de débourrement pour les bourgeons du milieu de tige

A la vue des résultats de l'analyse précédente, l'analyse qui suit se restreint aux bourgeons de la partie centrale de la tige pour l'essai 1 uniquement. L'effet de la variété et de la température ainsi que leur interaction est étudié sur les proportions et durée de débourrement. Les effets fixes considérés sont : la variété (R570 ou R583) et la température (18°C ou 24°C).

2.4.4. Propriétés de débourrement, production de racines, teneur en sucre (essai 1)

Pour l'ensemble des bourgeons de l'essai 1, les variations de teneur en sucres et de production de racines sont analysées par un modèle linéaire mixte avec comme effets fixes la variété, la classe topophysique et la présence ou l'absence de levée. L'effet de la température est pris en compte comme effet fixe pour étudier les variations de production de racines.

¹⁵ Variances des valeurs prédites et observées sont différentes. Le modèle prédit mal le processus étudié souvent dans les faibles et/ou fortes valeurs.

3. Résultats

3.1. Effectifs de bourgeons en début et fin d'expérimentation

Le nombre de bourgeons disponibles est différent selon les 3 variétés, en raison de nombres d'entrenœuds différents sur les tiges de chaque variété. La variété R570 possède le plus petit nombre d'entrenœuds, et la variété R583 le plus grand (Tableau 3).

Bien qu'on ait prélevé le même nombre de tige par variété pour chaque essai, le nombre de bourgeons mis en condition de levée est plus élevé pour R583 que pour R570 (43% et 30% de plus respectivement pour les essais 1 et 2).

Tableau 3. Essais 1 et 2 : Effectifs

Nombre de tiges, de bourgeons, de bourgeons par tige, taux globaux de bourgeons non débourrés à cause des dégâts physiques ou à cause des insectes, et nombre de bourgeons disponibles pour les 2 ou 3 variétés présents.

Essai	Variété	Nb tiges	Nb initial de bourgeons	Nb moyen de bourgeon par tige	Taux global de bourgeons abimés	Taux global de bourgeons attaqués	Nb final de bourgeons
			Initiaux		(%)	(%)	Finaux
1	R570	20	317	15.9	4.1	2.8	281*
	R583	20	452	22.6	4.4	8.4	394
2	R570	10	210	21.0	11.0	4.0	179
	R577	10	237	23.7	21.9	14.8	150
	R583	10	272	27.2	9.9	14.0	207

**Tous les bourgeons de la tige n°5 de la variété R570 à 18°C ont été retirés de l'essai 1.*

Les proportions de bourgeons non levés peuvent être élevées. Parmi les raisons : une forte proportion est constituée de bourgeons abimés, malformés ou bien attaqués par des foreurs.

La proportion de bourgeons abimés est stable par essai entre les variétés R570 et R583 (4,1% et 4,4% pour l'essai 1 et 11% et 9,9% pour l'essai 2 respectivement), elle est de 21,9% pour R577 sur l'essai 2. Le foreur de tige diminue lui aussi le nombre potentiel de bourgeons aptes à débourrer. Le pourcentage de bourgeons endommagés par l'insecte varie selon les variétés et augmente dans le temps de 2,8% pour la R570 dans l'essai 1 (prélèvement à 9 mois) à 14,8% pour R577 dans l'essai 2 (prélèvement à 11 mois).

Les dégâts observés sont comparables à ceux décrits à La Réunion et en Afrique du Sud (Goebel and Way, 2009). La relative résistance observée pour la variété R570 qui subit 3 à 4 fois moins d'attaques que R577 ou R583 selon les essais est concordante avec celle décrite dans la littérature (Goebel, 1999, Vercambre et al., 2001).

Si l'on retire de l'étude les bourgeons ayant subi un dégât physique ou ayant été abimés par un insecte, on obtient alors des effectifs de 40% et 16% de plus de bourgeons pour R583 que pour R570, respectivement dans les essais 1 et 2.

3.2. Longueurs de tiges et nombres de bourgeons : regroupement en quatre classes de topophysie

Le nombre de bourgeons, qui correspond au nombre d'entrenœuds varie de façon importante (+ 25%) entre tiges pour une même variété (essai 1- Figure 28).

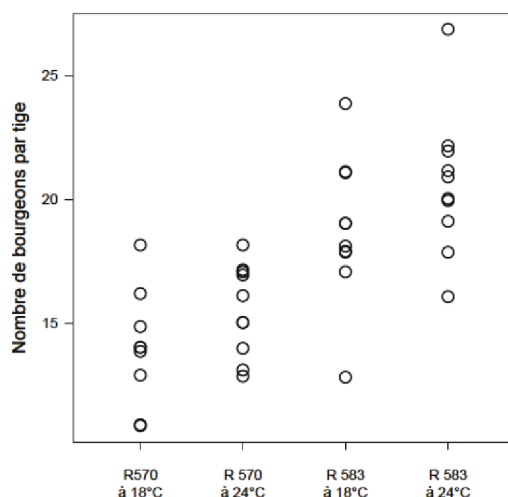


Figure 28. Essai 1 : Nombre de bourgeons par tige par variété (R 570 et R583) et par température (18°C et 24°C)

Sur 10 tiges, le nombre de bourgeons levés varie fortement en fonction de leur topophyse (Tableau 4). Les durées de levée varient aussi selon la topophyse (Tableau 5) mais encore entre bourgeons le long de chaque tige, et plus spécifiquement aux extrémités des tiges.

Au sommet de la tige, les proportions de levées sont parfois assez faibles. Pour le bas de tiges, aux positions ou rangs de bourgeons les plus élevés (Tableau 4), les effectifs sont très variables du fait des longueurs de tiges et nombres de bourgeons différents entre variétés. Il apparaît nécessaire, pour considérer à part les bourgeons situés près du sol, de repérer ces bourgeons de base de tige par rapport à celle-ci et non plus par rapport au sommet de la tige, comme ce serait le cas avec leurs numéros.

Tableau 4. Essai 1 : Nombre de bourgeon débourrés en fonction de leur position originale le long de la tige-mère (topophysie) pour 10 tiges de chaque variété par combinaison variété * température; -, pas de bourgeon (les bourgeons abîmés ou ceux dont la non levée est imputée à l'attaque de foreurs de tiges sont retirés des effectifs)

Essai 1		Position du bourgeon*																														
Température de chambre	Variété	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
18°C	R570	4	6	8	6	9	7	6	8	4	6	5	5	5	4	3	1	1	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	R583	6	9	9	10	9	7	6	8	8	8	8	7	6	9	8	9	5	7	6	5	3	3	1	1	1	1	1	0	-		
24°C	R570	2	2	8	8	8	8	7	8	8	8	8	6	7	8	5	3	2	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	R583	6	9	9	10	8	10	8	6	6	4	6	6	7	7	7	8	7	7	6	7	6	4	2	3	2	0	1	1	1		

* La numérotation débute depuis le haut de tige (se reporter à la Figure 27)

Au sommet de la tige mais aussi à sa base, il en est de même avec les durées de débourrement des bourgeons qui sont, elles aussi, très variables (Tableau 5).

Un découpage apparaît indispensable pour identifier des zones de la tige à débourrement homogène. Les bourgeons 3 et 4 ainsi que les 4 bourgeons inférieurs de chaque tige ont été isolés (Figure 27 page 58) et composent respectivement le haut de tige et le bas de tige car ils débourrent moins que les autres bourgeons du reste de la tige. Le milieu de tige est lui-même découpé en 2 classes, pour éviter des effectifs trop élevés par rapport aux extrémités et ne pas risquer de manquer la mise en évidence d'un gradient le long de la tige. Les bourgeons du milieu de tige sont répartis à égalité entre les deux lots, avec un bourgeon de plus pour la partie supérieure (milieu haut) si le nombre de bourgeon est impair. Chaque tige est donc découpée en 4 classes, de taille variable pour les parties centrales selon sa longueur d'origine (partie blanches et grisées du Tableau 5).



Clichet : C Poser

Photo 4. Préparation des boutures et boutures en chambre climatiques

Tableau 5. Essais 1 et 2 : Durées de débourrement par bourgeon et tige pour

Nombre de jours nécessaires au débourrement de bourgeons en fonction de leur topophysie sur leur tige mère, nombre total de bourgeons et nombre de bourgeon débourrés par tige pour les variétés R570, R577 et R583. Les parties grisées claires et foncées illustrent l'alternance des 4 classes de topophysie par tige : « haut de tige », classe composée du 3^e et 4^e bourgeon à partir du dernier ochréa visible (TVD) ; « bas de tige », classe composée des 4 bourgeons à la base de la tige ; « milieu haut » et « milieu bas » désignent le reste des bourgeons divisé en deux parties égales.

A, boutures abimées ; B, boutures attaquée par foreur de tige ; -, bourgeon non levé. Pour l'essai 2 : R, bouture raccourcie ; E, bouture entière.

Essai 1

		Durée de débourment-levée																																Numéro de bourgeon	
		Rang du bourgeon																																Total	Levés
Variété	Numéro de tige	Température	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
R570	6	18°C	-	15	18	16	37	-	40	36	-	27	-	B																			12	7	
	7		21	18	18	16	19	B	19	B	-	-	39	-	-	-																	13	7	
	2		-	-	44	-	21	27	47	37	46	-	-	-	-	-																	14	6	
	5		-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-																	14	1	
	1		37	41	37	29	37	28	37	37	B	-	B	28	37	-	-	-																15	10
	10		-	-	-	43	29	39	B	24	-	26	-	-	-	-	21																15	6	
	8		42	-	12	13	12	12	B	12	16	16	18	16	18	21	18																15	13	
	3		-	16	37	23	14	39	-	36	-	12	37	28	23	36	-	B															16	11	
	4		36	46	18	B	33	-	37	20	18	30	36	27	40	27	40	-	-															17	13
	9		-	12	26	B	30	39	16	12	16	13	12	13	16	12	-	18	12	-	-													19	14
	5	24°C	-	-	9	8	8	8	11	9	-	9	B	12	18	21																		14	10
	2		24	-	-	16	16	10	7	20	-	13	10	-	22	-	-																	15	9
	3		-	9	14	10	13	8	B	B	10	-	10	-	12	13	11																	15	10
	7		-	-	13	B	9	8	7	7	8	10	19	9	14	19	19																	15	12
	1		-	-	10	10	8	-	8	7	8	7	8	8	16	11	-	-	-															17	11
	6		-	-	14	11	11	11	10	14	16	10	16	-	-	-	14	10	11															17	12
	9		B	-	B	-	-	-	10	9	9	14	12	-	-	16	16	-	-															17	7
	4		11	9	9	11	B	9	B	8	8	12	-	14	10	21	10	-	13	17	10													19	15
	8		-	-	9	10	10	10	9	B	7	-	7	18	-	10	B	14	B	12	8													19	12
	10		-	-	9	9	9	7	-	9	10	11	12	9	16	9	B	9	-	11	12													19	14
R583	9	18°C	11	16	18	18	12	12	19	B	14	18	B	36	-	-	B	-	B															17	10
	1		22	22	29	39	36	19	41	33	13	B	37	19	26	24	13	18	B	-	13	24												20	17
	3		-	10	10	10	11	11	10	10	10	7	B	B	-	10	-	9	B	12	13	13												20	14
	5		19	18	18	13	19	18	B	18	13	42	8	27	11	15	15	15	15	-	18	-												20	17
	8		-	10	19	11	15	11	B	9	12	10	12	10	20	12	10	13	16	16	-	-												20	16
	2		26	14	B	18	20	B	13	34	B	10	12	14	15	16	16	23	9	16	18	18	10											21	18
	7		-	16	18	19	18	19	11	15	13	13	12	12	11	11	10	12	9	27	-	-	-											21	17
	4		20	33	21	32	36	-	-	16	12	14	6	B	B	29	11	8	B	9	B	18	-	20										22	15
	6		-	-	18	19	-	B	8	-	12	-	12	B	B	10	16	16	13	23	12	-	13	47	11	B	19							25	15
	10		37	24	37	30	28	18	B	11	B	11	21	21	9	9	9	11	B	9	24	8	10	10	B	10	-	14	30	-				28	22
	6	24°C	7	7	9	6	-	7	-	6	-	7	-	7	17	8	7	7	-	-	-	-												20	12
	7		B	6	19	7	6	7	7	6	-	B	7	B	-	6	7	B	5	B	7	7	6											21	14
	8		7	9	6	7	7	6	5	6	5	7	5	7	6	9	8	7	5	7	7	7	B	-										22	20
	1		6	B	6	6	6	6	-	-	5	6	6	19	6	-	6	6	6	7	-	8	7	8	8									23	18
	3		-	6	8	9	8	8	6	-	6	B	12	B	-	B	B	7	-	7	6	6	6	B	-	-								24	13
	5		B	8	8	8	7	5	6	B	-	-	-	B	4	5	B	7	6	-	6	-	7	10	7	8								24	15
	10		6	7	6	7	8	8	6	B	6	A	-	5	6	7	13	10	B	10	8	7	-	-	-	-								24	16
	9		11	7	B	7	B	7	6	5	B	A	6	6	6	6	6	6	4	6	4	B	B	B	-	8								25	17
	4		8	7	10	7	7	7	7	7	4	5	-	B	-	B	-	B	6	6	-	B	7	8	-	7	-	-						26	15
	2		-	7	9	8	8	10	9	9	7	-	10	8	9	10	9	8	7	10	B	6	8	7	B	10	8	-	7	7	7			29	24

Essai 2

			Durée de débourrement-levée																																	Nombre de bourgeons	
Variété	Numéro de tige	Longueur	Rang du bourgeon																																	Total	Levés
			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
R570	10	R	A	10	11	10	10	12	9	A	13	17	-	14	13	12	12	11	16	B														18	14		
	1	E	8	11	10	10	8	8	8	9	10	-	A	16	11	-	-	A	-	A	16													19	12		
	7	R	A	A	A	6	7	7	7	8	8	10	11	A	10	13	7	12	A	22	-	A												20	13		
	2	E	-	11	13	10	8	7	8	8	8	10	-	12	12	11	12	10	22	-	A	-	-											21	15		
	4	E	17	10	11	8	8	10	8	-	10	12	14	13	13	13	-	13	-	10	7	7	20											21	18		
	6	R	A	A	A	10	8	11	10	9	11	10	9	12	12	12	11	-	12	11	11	13	20											21	17		
	9	R	-	12	12	7	9	6	7	7	7	9	9	-	-	9	15	10	10	10	A	11	-											21	16		
	3	E	-	-	9	8	8	7	B	6	-	13	A	9	10	8	A	10	9	9	-	8	B	13	13									23	15		
	5	E	-	-	11	9	11	9	B	9	9	9	10	13	11	B	A	17	11	A	B	-	-	-	-									23	12		
8	R	A	A	11	7	7	7	6	7	10	9	10	10	10	10	-	10	13	16	B	B	A	12											23	17		
R577	2	E	14	9	9	9	8	8	A	11	11	8	B	B	14	A	12	-	15	B														18	12		
	3	E	A	A	A	B	13	A	A	19	7	8	7	A	6	-	A	B	A	B	B													19	6		
	8	R	A	A	8	8	7	B	7	7	8	7	10	10	-	11	20	13	B	-	-													19	12		
	10	R	A	A	7	7	7	8	7	9	8	10	19	10	A	A	11	-	B	A	-	-	10	A	-									23	12		
	6	R	A	A	A	15	14	11	10	7	9	8	9	9	11	9	11	9	B	-	B	A	A	A	B									23	13		
	1	E	A	-	9	8	7	6	8	7	8	7	A	B	B	6	B	8	B	11	12	-	-	B	-	B								24	12		
	5	E	-	A	9	B	9	9	6	8	-	A	8	B	9	A	12	B	B	B	15	-	B	A	-	-	A							25	9		
	9	R	A	A	9	8	12	10	7	9	10	B	10	A	-	12	15	B	18	18	14	B	-	A	-	22	A	B	-					27	14		
	4	E	-	10	8	8	-	8	10	14	8	9	11	-	10	A	10	-	-	-	A	A	12	-	15	10	B	17	12	12				28	17		
7	R	A	A	A	7	7	7	7	7	7	7	B	A	B	A	B	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	-	B	-	11	A	B	31	8			
R583	2	E	A	A	12	10	23	8	-	12	-	8	8	9	10	9	14	14	17	-	A	-	26	16	-	-								24	15		
	7	R	A	A	8	8	7	7	B	B	A	-	-	-	-	B	B	B	13	11	B	11	-	B	-								24	7			
	6	R	A	A	A	9	8	-	8	A	7	6	7	7	7	10	10	-	21	18	17	16	12	10	12	12	-							25	18		
	1	E	8	8	B	11	9	7	8	9	B	8	9	7	7	7	10	10	B	14	10	9	11	A	10	B	9	A					26	20			
	9	R	A	-	8	9	5	13	5	B	5	9	B	5	B	16	5	B	15	6	B	8	B	B	B	B	B	B	B					27	13		
	10	R	A	A	B	8	7	7	5	5	B	6	6	6	6	6	8	7	10	7	10	8	9	9	A	-	-	7	9	B			28	20			
	4	E	-	A	9	10	9	8	B	7	7	A	7	8	9	13	8	9	7	9	-	-	13	10	-	9	A	-	-	8	10			29	19		
	5	E	9	A	10	9	9	11	5	8	6	6	9	8	8	9	9	8	8	-	10	9	10	9	13	8	20	A	11	11	-			29	25		
	8	R	A	A	A	7	B	7	8	12	6	6	7	B	8	B	B	5	B	6	B	10	8	13	9	B	-	8	11	B	B			29	16		
3	W	A	-	10	8	-	10	-	12	10	7	-	17	8	A	11	7	9	10	9	A	B	-	-	-	16	-	14	-	B	9	9	31	17			

3.3. Effet du raccourcissement de la bouture sur le pourcentage et la durée de débourrement

Il n'existe pas de différence significative de proportion (BBP) et de durée (BBT) de débourrement pour les bourgeons de boutures raccourcies ou non raccourcies et issues des milieux rassemblés haut et bas de tige (Essai 2 - Tableau 6). Cela signifie que l'entrepreneur peut être raccourci sans conséquences pour les propriétés de débourrement et justifie l'emploi de boutures courtes. De ce fait, dans l'essai 2, les traitements « raccourcis » et « non raccourcis » seront traités de façon confondue.

Tableau 6. Essai 2 : Effectifs levées selon raccourcissement

Nombre total de bourgeons (nt), Pourcentage moyen de bourgeons levés (BBP), Nombre total de bourgeons levés (nl) et durée moyenne de débourrement-levée (BBT jour) pour 3 variétés de boutures raccourcies ou non, issues de milieu de tige, placées en serre à une température horaire moyenne de 25,3°C +/- 1,3°C (entre parenthèses, les écarts-types associés aux moyennes).

Variété	Longueur de bouture	nt	BBP (%)	n	BBT (jours)
R570	Raccourcies	69	92,8 (3,1)	64	9,9 (2,4)
	Entières	68	86,8 (4,1)	59	10,3 (2,7)
R577	Raccourcies	64	85,9 (4,3)	55	9,8 (3,3)
	Entières	58	82,8 (5,0)	48	9,4 (2,7)
R583	Raccourcies	75	88,0 (3,8)	66	8,6 (3,4)
	Entières	98	84,7 (3,6)	83	9,8 (3,0)

3.4. Effet de la topophysie du bourgeon sur le pourcentage et la durée de débourrement levée

Pour chacune des variables étudiées, l'analyse de variance réalisée sur le modèle complet fait ressortir le fait que l'effet topophysique n'est pas le même selon la variété, ce qui signifie qu'il existe une interaction entre la variété et la position (résultats non présentés). C'est pourquoi l'analyse du taux et de la durée de débourrement-levée sont étudiés séparément pour chaque combinaison variété * température.

3.4.1. Pourcentage de débourrement-levée (BBP)

a) Essai 1

Les effectifs des classes topophysiques par variété et par température varient de 17 boutures (haut de tige R583 à 24°C) à 82 boutures (milieu haut de R583 à 24°C) (Tableau 7). Le pourcentage de débourrement-levée varie de 21,1 % (haut de tige de R570 à 24°C) à 93,8 % (milieu bas de R583 à 18°C). Pour chaque traitement (combinaison variété * température), les bourgeons issus du milieu de tige (milieu haut et milieu bas) lèvent significativement dans la même proportion. Ces mêmes bourgeons, lèvent en plus grande proportion que ceux du bas de tige (toutefois non significatif pour R570 à 24°C) et ont tendance, excepté pour R583 à 24°C à lever en plus forte proportion que les bourgeons issus du haut de tige bien que cela ne soit pas significatif.

Tableau 7. Essai 1 : Effectifs levées

Nombre total de bourgeons, pourcentage (BBP) et nombre de bourgeons levés et durée de débourrement-levée (BBT jour) en fonction de la classe topophysique de boutures d'un bourgeon pour 2 variétés (R570 et R583) placées en chambres climatiques à 18°C et 24°C (entre parenthèses, les écarts- types).

Variété	Température	Classe de boutures	n	BBP (%)		n	BBT (jour)	
R570	18°C	Haut	18	55.6	^{bc*} (11.7)	10	28.4	^{ns} (13.1)
		Milieu haut	39	89.7	^a (4.9)	35	25.8	^{ns} (10.5)
		Milieu bas	35	77.1	^{ab} (7.1)	27	26.1	^{ns} (11.6)
		Bas	34	44.1	^c (8.5)	15	25.4	^{ns} (9.0)
	24°C	Haut	19	21.1	^c (9.4)	4	13.3	^{abc} (7.2)
		Milieu haut	52	88.5	^a (4.4)	46	9.8	^a (2.3)
		Milieu bas	46	78.3	^{ab} (6.1)	36	11.6	^b (3.8)
		Bas	38	68.4	^b (7.5)	26	13.6	^c (3.8)
R583	18°C	Haut	20	75.0	^{ab} (9.7)	15	19.9	^b (7.9)
		Milieu haut	69	92.8	^a (3.1)	64	17.9	^{ab} (8.4)
		Milieu bas	65	93.8	^a (3.0)	61	14.7	^a (7.5)
		Bas	34	61.8	^b (8.3)	21	18.5	^b (8.3)
	24°C	Haut	17	88.2	^{ab} (7.8)	15	7.3	^{ns} (1.3)
		Milieu haut	82	84.1	^a (4.0)	69	7.2	^{ns} (2.1)
		Milieu bas	72	84.7	^a (4.2)	61	7.2	^{ns} (2.6)
		Bas	35	54.3	^b (8.4)	19	7.3	^{ns} (0.9)

Pour chaque combinaison variété-température, les taux et durées moyens de débourrement-levé suivis par des lettres différentes sont significativement différents au seuil de probabilité de 0.05 par un test Tukey HSD; n.s., non significatif; s.d. (entre parenthèse).

Pour les cas de durée de débourrement (BBT), les données ont été transformées pour homogénéiser au mieux les variances.

b) Essai 2

Les effectifs des classes topophysiques par variété varient de 6 boutures pour les classes du haut de tige de R577 et R583 à 90 boutures pour la classe milieu haut de R583 (Tableau 8). Les tailles des classes topophysiques sont plus hétérogènes dans l'essai 2 que dans l'essai 1. Ceci provient du fait que les tige-mères à l'origine des boutures sont plus âgées (11 mois pour l'essai 2 contre 9 mois pour l'essai 1) et comportent de ce fait plus de bourgeons. Les boutures des classes hauts et bas de tige, au maximum de 4 par tige et par classe sont en proportion plus faible.

Pour chacune des trois variétés, les bourgeons du milieu haut de tige lèvent en proportion significativement plus forte que les bourgeons du milieu bas de tige. Ceux du milieu bas de tige lèvent eux-mêmes en proportion significativement plus forte que les bourgeons du haut et du bas de tige (proportions similaires entre eux).

Tableau 8. Essai 2 : Effectifs levées

Nombre total de bourgeons, pourcentage (BBP) et nombre de bourgeons levés et durée de débourrement-levée (BBT jour) en fonction de la classe topophysique de boutures d'un bourgeon pour 3 variétés (R570, R577 et R583) placées en serre à une température horaire moyenne de 25,3°C +/- 1,3°C (entre parenthèses, les écarts- types).

Variété	Classe de boutures	n	BBP (%)	n	BBT (jour)
R570	Haut	13	53.8 ^c (13.8)	7	11.3 ^{ab*} (2.8)
	Milieu haut	72	97.2 ^a (1.9)	70	8.9 ^a (1.7)
	Milieu bas	65	81.5 ^b (4.8)	53	11.7 ^b (2.6)
	Bas	29	65.5 ^c (8.8)	19	12.8 ^b (4.3)
R577	Haut	6	50.0 ^c (20.4)	3	11.0 ^{ab} (2.6)
	Milieu haut	71	95.8 ^a (2.4)	68	8.7 ^a (2.3)
	Milieu bas	51	68.6 ^b (6.5)	35	11.4 ^b (3.6)
	Bas	22	40.9 ^c (10.5)	9	13.8 ^b (3.7)
R583	Haut	6	50.0 ^c (20.4)	3	8.3 ^{ab} (0.6)
	Milieu haut	90	91.1 ^a (3.0)	82	8.4 ^a (2.7)
	Milieu bas	83	80.7 ^b (4.3)	67	10.4 ^b (3.5)
	Bas	28	64.3 ^c (9.1)	18	11.1 ^b (4.2)

Pour chaque combinaison variété-température, les taux et durées moyens de débourrement-levé suivis par des lettres différentes sont significativement différents au seuil de probabilité de 0.05 par un test Tukey HSD. s.d. (entre parenthèse).

Pour les cas de durée de débourrement (BBT), les données ont été transformées pour homogénéiser au mieux les variances.

3.4.2. Durée de débourrement BBT

Une fois les bourgeons non levés écartés, les classes topophysiques restent de taille hétérogène avec par classe 4 à 69 boutures pour l'essai 1 et 3 à 82 boutures pour l'essai 2.

a) Essai 1

Dans le cas de l'essai 1, pour 2 traitements sur 4 (R 570 à 18°C et R583 à 24°C), la durée moyenne de débourrement BBT est similaire pour les 4 classes topophysiques (Tableau 7). Pour les 2 autres traitements (R570 à 24°C et R583 à 18°C), il n'y a aucune classe strictement différente de chacune des 3 autres de son traitement. Néanmoins, les classes du milieu ont dans l'ensemble des durées un peu plus courtes que celles des classes haut de tige et bas de tige, excepté pour la classe milieu haut de R583 à 18°C qui a une durée moyenne longue (Tableau 7).

b) Essai n°2

Dans le cas de l'essai 2, pour les 3 variétés, les bourgeons du milieu haut de tige lèvent significativement plus rapidement que ceux des bourgeons du milieu bas et du bas de tige (Tableau 8). Les bourgeons du milieu haut ont une durée de levée similaire aux autres classes, pour chacune des 3 variétés (Tableau 8).

En synthétisant ces résultats en vue d'éliminer les classes topophysiques à débourrement le plus différent, il apparaît que les classes du haut et du bas de tige, qui ont des proportions de débourrement plus faibles que les autres — la plupart du temps significativement —, peuvent être éliminées pour l'analyse suivante sur les effets de variété et de température. De plus, même si quelques différences apparaissent entre le milieu haut et le milieu bas pour les durées, ces deux classes restantes seront regroupées en raison de leur proximité, de façon à garder des effectifs importants sans multiplier les modalités de facteurs lors des comparaisons.

Par conséquent, la suite de l'analyse des propriétés de débourrement sera faite en n'utilisant que les bourgeons de numéro supérieur à 5 et en excluant les 4 bourgeons les plus bas de la tige

3.5. Effet de la variété et de la température sur les propriétés de débourrement (proportion, durée, dispersion) de bourgeons issus du milieu de la tige, en conditions de température constante

Cette analyse est réalisée avec les bourgeons de l'essai 1 seulement, car ses températures constantes permettent d'analyser l'effet température. Seuls les bourgeons de milieu de tige sont considérés.

3.5.1. Proportion de débourrement (BBP)

Les effectifs oscillent de 65 boutures pour R 570 à 18°C à 145 boutures pour R 583 à 24°C (Tableau 9). Le taux de débourrement n'est pas significativement différent entre variétés, ni entre températures. La proportion de débourrement est proche de 83 % aux 2 températures pour R570 et atteint sa valeur la plus élevée, 93,3 %, pour R583 à 18°C.

Tableau 9. Essai 1 : Effectifs levées des milieux de tiges

Nombre total de bourgeons, pourcentage (BBP) et nombre de bourgeons levés et durée de débourrement-levée (BBT jour) de boutures de milieu de tige-mère pour les variétés R570 et R583 placées dans deux chambres climatiques à température constante de 18 °C et 24°C (entre parenthèses, les écarts-types).

	Température	Classe de boutures	n	BBP (%)	n	BBT (jour)	$\Theta_T(25-75)$ (jour)
R570	18°C	Milieu	74	83.8 ^{n.s.} (4.3)*	62	25.9 ^a (10.9)	21
	24°C	Milieu	98	83.7 ^{n.s.} (3.7)	82	10.6 ^b (3.2)	8
R583	18°C	Milieu	134	93.3 ^{n.s.} (2.2)	125	16.3 ^c (8.1)	3
	24°C	Milieu	154	84.4 ^{n.s.} (2.9)	130	7.2 ^d (2.3)	2

Pour chaque combinaison variété-température, les taux et durées moyens de débourrement-levée suivis par des lettres différentes sont significativement différents au seuil de probabilité de 0.05 par un test Tukey HSD; n.s., non significatif; s.d. (entre parenthèse).

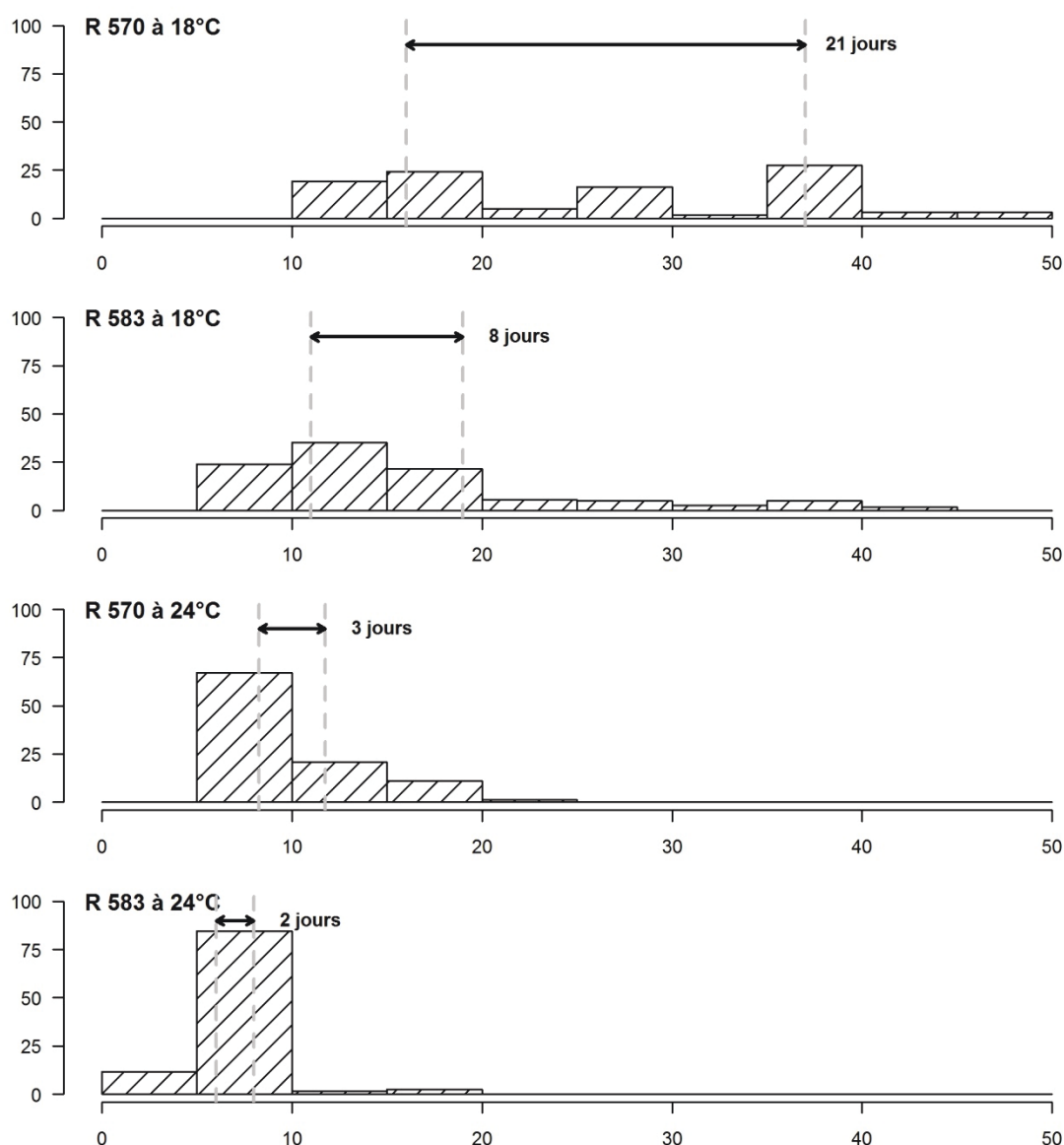
3.6. Effet de la variété et de la température sur la durée de débourrement-levée des bourgeons issus de centre de tige mère

3.6.1. Durée de débourrement (BBT)

Les classes topophysiques comportent de 62 à 130 boutures qui ont levées (Tableau 9). Pour les deux variétés, les bourgeons débourent plus rapidement à 24°C qu'à 18°C. Les bourgeons de la variété R583 ont tendance à débourent plus vite que ceux de la R570 et ce aux deux températures sans que cela ne soit significatif. Les durées moyennes de débourrement sont différentes entre les 4 traitements.

3.6.2. Dispersion de la population

Considérant la moitié médiane des durées c'est-à-dire le temps nécessaire pour passer de 25% à 75% des durées enregistrées, la représentation de la distribution des durées de débourrement enregistrées par traitement met en évidence la différence marquée entre traitements (Figure 29). A 18°C, 21 jours sont nécessaires pour que la moitié médiane du lot de boutures de R570 lèvent quand 3 jours seulement sont nécessaires à R583. A 24°C, cet étalement de la levée de boutures est respectivement de 8 et 2 jours pour les variétés R570 et R583. Les deux variétés ont donc des proportions de levées semblables, mais des durées et un étalement beaucoup plus grand pour R570 comparativement à R583.



Les traits pointillés verticaux représentent les 1er et 3e quartiles.

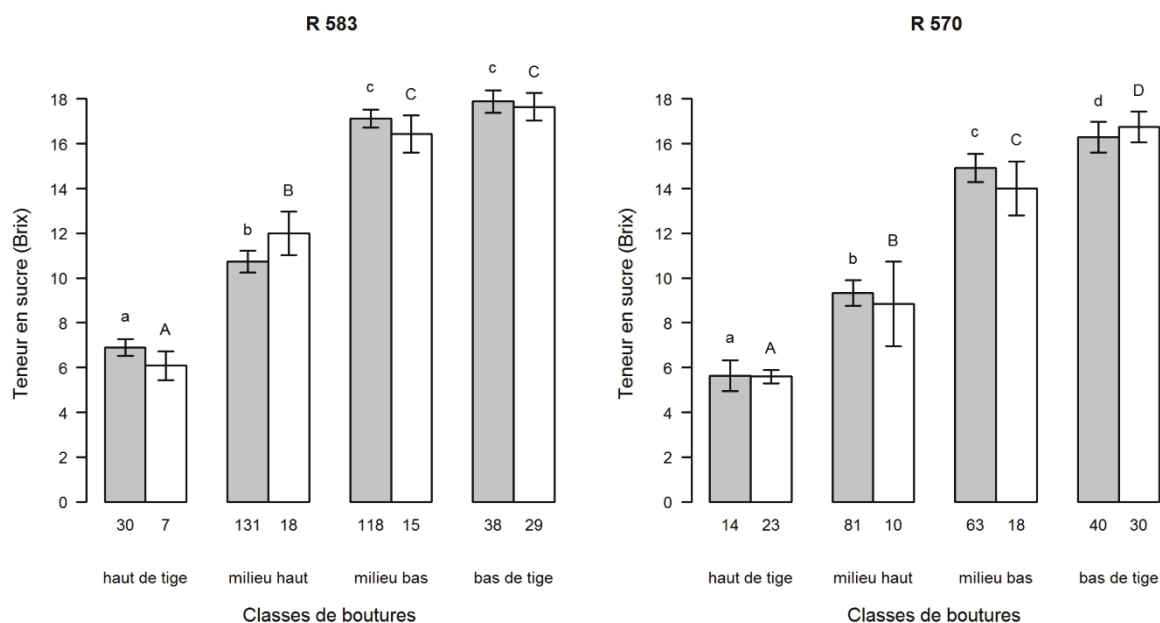
Figure 29. Essai 1 : Distribution de la durée nécessaire au débourrement des bourgeons centraux pour deux variétés R570 et R583 à deux températures 18°C et 24°C.

3.7. Evolution de la teneur en sucres selon la topophysie et relation avec les propriétés de débourrement

3.7.1. Teneur moyenne en sucre des boutures selon leur classes topophysiques

En moyenne, que ce soit pour les bourgeons débourrés (barres grises, Figure 30) ou les bourgeons non débourrés (barres blanches), la teneur en sucres croît régulièrement du haut vers le bas de la tige pour les deux variétés. Pour chaque variété, les teneurs sont statistiquement différentes d'une classe topophysique à l'autre à l'exception des classes milieu bas et bas pour la variété R 583, qui ont toutes des valeurs élevées. Pour chaque classe topophysique, la concentration en sucres de la variété R583 est statistiquement supérieure à celle de la variété R570 (non illustré, p-value < 0.001).

Pour les deux variétés et toutes les classes de boutures, les différences de teneurs en sucres entre boutures levées ou non ne sont pas significatives (test de Fischer au seuil de 1% - non illustré).



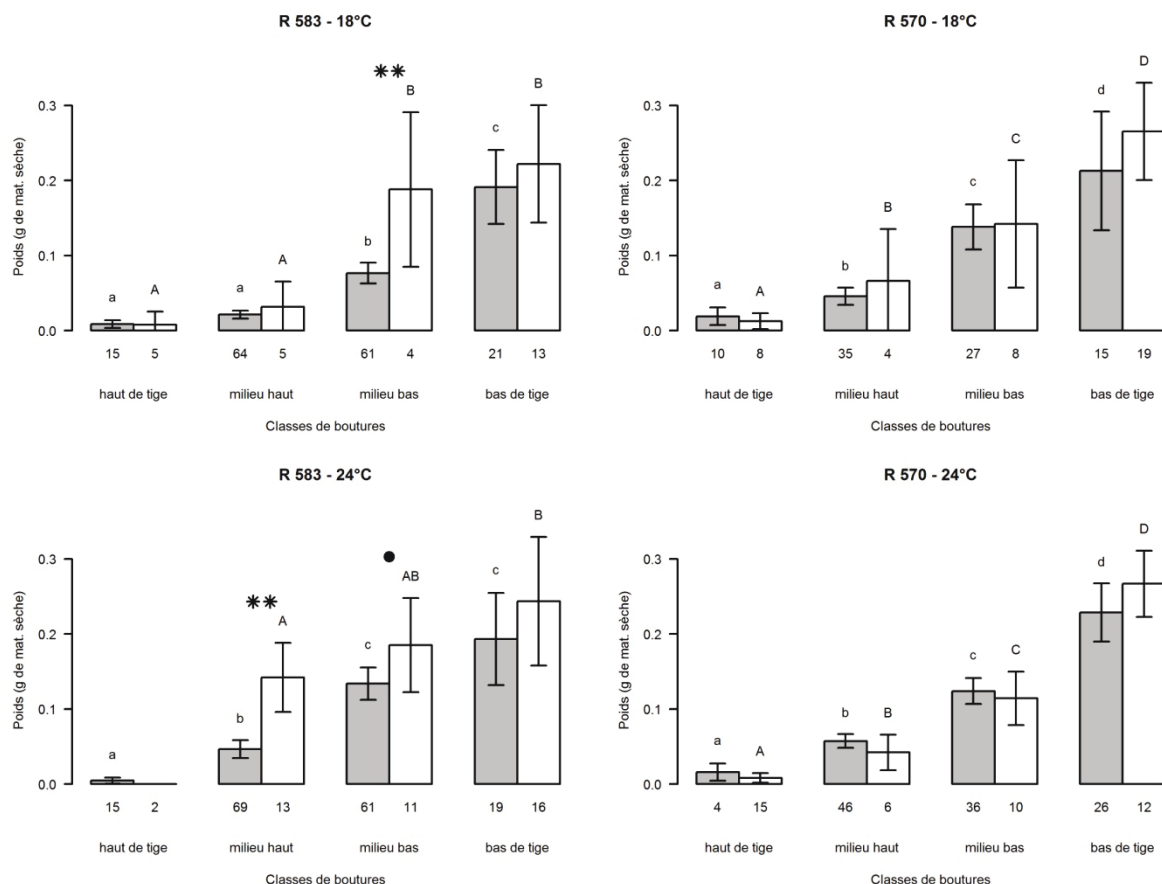
■, boutures levées ; □, boutures non levées.

Les barres représentent les intervalles de confiance et les chiffres au bas des diagrammes aux effectifs. Pour chaque variété, en analysant séparément les boutures levées des non levées, les moyennes avec les mêmes lettres (capitales ou minuscules) ne sont pas significativement différentes selon un test de comparaisons multiples de Tukey au seuil de 0.05.

Figure 30. Essai 1 : Teneur en sucre moyennes de boutures selon leur classe topophysique de provenance sur le plan mère et selon la variété et selon leur succès de levée.

3.8. Production de racine selon la topophysie, la température, la levée et selon la variété

Sur l'ensemble des boutures levées (Figure 31), la production de racines est significativement plus élevée à la base de la tige qu'à son sommet pour la variété R570. Pour la variété R583, même si la tendance est la même, les différences ne sont pas significatives entre toutes les classes topophysiques.



En gramme de matière sèche) de boutures d'un seul bourgeon selon la variété, la température, la classe topophysique de provenance de la tige-mère et selon le succès de levée ■, boutures levées; □, boutures non levées.

Les barres représentent les intervalles de confiance et les chiffres au bas des diagrammes les effectifs. Pour chaque traitement, en analysant séparément les boutures levées des non levées, les poids avec les mêmes lettres (capitales ou minuscules) ne sont pas significativement différents selon un test de comparaisons multiples de Tukey HSD au seuil de 0.05. Les données ont été transformées. **, ● mettent en évidence une différence significative entre boutures levées et non levées selon le test exact de Fisher aux seuils respectifs de probabilité de 0,001 et 0,1.

Figure 31. Essai 1 : Production moyenne de racines par bouture

La quantité moyenne de racines émises par les boutures de bas de tige reste cependant significativement supérieure dans tous les cas à celles émises par les classes de boutures du « milieu haut » et du « haut de tige » (p -value < 0.05). Pour les boutures non levées (Figure 31), aux effectifs plus faibles que celles des levées, la tendance à produire plus de racines au fur et à mesure que l'on considère les classes vers le bas de tige est significative dans le cas de la R570, mais pas pour R583.

3.8.1. Racines émises par les bourgeons déboutrés ou non

A l'exception des bourgeons de la variété R570 à 24°C et celles du haut de tige de la variété R570 à 18°C, les boutures qui n'ont pas déboutré ont produit, en moyenne, plus de racines que celles qui ont déboutré (tendance significative à 10 % pour 3 situations sur 11).

Pour les classes du milieu de tige de la variété R583, les boutures plantées à 24°C produisent significativement plus de racines que celles à 18°C (p -value < 0.05 ; chiffres non présentés).

En conclusion, les gradients d'émission de racines sont plus marqués et plus souvent significatifs pour la variété R570 que pour la variété R583. Dans la plupart des cas, l'émission de racines est plus importante pour les bourgeons non débourrés.

4. Discussion

Le développement des bourgeons axillaires des plantes a été étudié depuis très longtemps, car il agit sur l'architecture ou la productivité des plantes, qu'il s'agisse d'arbres forestiers ou fruitiers, de plantes herbacées (tallage pour les graminées, port ramifié ou non) et les propriétés de développement des bourgeons définissent l'aptitude au bouturage de plantes lorsque les bourgeons sont détachés de la plante-mère. Ces études multiples ont conduit à formuler des hypothèses et des théories sur les raisons pour lesquelles un bourgeon reste dormant ou devient actif. Des relations s'exercent entre bourgeons à l'intérieur de la plante : le bourgeon apical exerce une dominance sur les autres bourgeons qui lui permet de se développer préférentiellement. C'est la sécrétion d'auxines par le bourgeon terminal qui inhibe le développement des bourgeons sous-jacents. Ces dominances expliquent le port plus ou moins buissonnant des ligneux et les propriétés intrinsèques de tallage plus ou moins abondant des espèces ou des variétés de graminées (hors effet du milieu) : absence de tallage du maïs, tallage plus ou moins abondant de différentes variétés de blé, comme sont décrites de façon synthétique ces formes architecturales par Doust (2007) dans son étude sur la phylogénie et la génomique.

De notre côté, nous avons étudié les relations établies sur la plante-mère et qui pourraient persister après le découpage de la tige de canne à sucre en boutures. Nous nous sommes posé les questions suivantes :

- y a-t-il des différences systématiques, progressives ou non, de développement entre bourgeons, selon leur origine le long de la tige ?
- des raisons trophiques peuvent-elles expliquer les comportements observés ?
- un rapprochement peut-il être fait avec d'autres plantes ?
- existe-t-il des différences variétales pour ces propriétés ?

Dans un même temps, pour des raisons pratiques d'expérimentation pour ce travail et pour ceux qui vont suivre nous avons voulu vérifier que le raccourcissement de la bouture était sans conséquence sur la caractérisation de son débourrement.

4.1. Sélection des boutures pour les travaux ultérieurs

4.1.1. État sanitaire et tri préalable

Avant la mise en débourrement, nous avons effectué un tri sérieux (élimination des bourgeons abimés ou piqués par le foreur ponctué) et un traitement sanitaire soigneux. Ce soin explique sans doute en partie les taux de débourrement élevés par rapport aux valeurs observées dans la pratique: ils sont proches des meilleures valeurs obtenues par exemple par Goodall (1998) dans une étude où les niveaux de débourrement atteints se situent entre 30 et 92 % selon les lots, pour un jeu de 6 variétés ayant subi 4 traitements de fongicides et de thérapie thermique. Au champ, la référence pour une levée satisfaisante est de l'ordre de 25% des bourgeons débourrés (Liu et al., 1998). En général ce sont des parties de tige, des boutures à plusieurs bourgeons qui sont mises à débourrer, des

inhibitions peuvent encore s'exercer au sein de ces boutures. La bonne qualité de débourrement observé dans nos essais est liée aux facteurs suivants : bouture à un seul "œil", traitement phytosanitaire, élimination de bourgeons extérieurement abîmés. Elle s'illustre par un fort taux de débourrement, ce qui peut être utile dans la pratique lorsqu'il s'agit de reproduire avec beaucoup de succès des individus peu nombreux.

L'état sanitaire des bourgeons peut être assez différent entre variétés : par exemple, pour R577 (essai 2), seulement 150 boutures ont été mises à débourrer sur les 237 présentes au départ, ce qui représente une suppression de 36,7% (Tableau 3). La sensibilité aux dégâts physiques ou aux attaques de parasites pénalise le potentiel de débourrement de façon différente selon les variétés.

4.1.2. Boutures courtes

Un premier jeu d'observations sur les bourgeons du milieu de tige a montré qu'il n'y a pas d'effet défavorable du raccourcissement à 4 cm de chaque côté du nœud de la bouture sur son débourrement (Tableau 6). Cela permet d'utiliser indifféremment des boutures raccourcies ou non, dans la suite de l'étude. Ce résultat conforte également le principe de l'utilisation de boutures à un bourgeon avec un entrenœud raccourci. Cette technique est déjà mise en œuvre par les centres de sélection, par de nouvelles entreprises productrices de boutures au Brésil (Martinho et al., 2010) et même certains agriculteurs pépiniéristes de La Réunion (Caro canne, Novembre 2008).

4.1.3. Découpage de la tige en zones homogènes

Pour chaque traitement, le groupement des bourgeons en 4 classes de position est justifié car ce découpage permet de diminuer la variabilité des propriétés de débourrement (proportion et durée) de chaque lot ainsi constitué. Pour les essais 1 et 2, les écarts-types des proportions de débourrement des boutures issues de milieux de tige sont d'ailleurs plus faibles que ceux de celles des extrémités de tige (Tableau 7) ce qui illustre une plus grande homogénéité de ces classes.

Pour les durées de débourrement, nous aboutissons aux mêmes conclusions, quoique de façon moins nette et pas toujours de façon significative : les bourgeons des extrémités débourent moins vite que ceux du centre de la tige. Pour la partie médiane de la tige (milieu haut et milieu bas), les durées de débourrement sont plus courtes dans la partie haute pour toutes les variétés de l'essai 2 et moins nettement pour l'essai 1, probablement à cause des effectifs sensiblement plus faibles de l'essai 1.

Le regroupement en classes permet donc de travailler sur des effectifs plus importants et de dégager les comportements communs aux différentes variétés et conditions pour les propriétés de débourrement des bourgeons : bourgeons des extrémités débourent en plus faible proportion et moins vite.

4.2. Gradient de développement des bourgeons selon leur topophysie

Sur l'ensemble des travaux conduits sur les différences de développement de bourgeons où l'origine des différences est recherchée, trois hypothèses principales sont avancées, (i) l'aptitude anatomique et morphologique à débourent (Albrechtová, 1997, Polák et al., 2006, Zamski et al., 1985), (ii) la dormance et sa nature (en liaison avec des équilibres hormonaux), (Rohde et al., 1997) et (iii) l'influence des conditions trophiques, qui sont très variables et parfois limitantes (Bonhomme et al., 2010, Gonzalez-Real and Baille, 2000, Lauri et al., 2010).

La question de notre étude concerne les aptitudes à débourrer de bourgeons de graminées pérennes, bouturés, donc détachés de la plante mère. Chez les graminées, les aptitudes de développement des bourgeons sont différentes selon leur position sur la plante et même selon les types de graminées (tallage plus ou moins important, développement floral chez le maïs, conduisant ou non à la prolifération d'épi (Ruget and Duburcq, 1983)). Ces aptitudes différentes, ainsi que les gradients de développement le long de la tige observés de longue date sur des bourgeons séparés de la plante (Bakker, 1999, Clements, 1939, Van Dillewijn, 1952) commencent à être bien décrites et expliquées (Doust, 2007).

4.2.1. Propriétés de débourrement des bourgeons, gradient de haut en bas de la tige (topophysie)

Dans notre travail, c'est la relation qui persiste entre bourgeons après leur séparation de la tige qui est étudiée, comme elle l'a été sur les plantes à bouturage usuel comme le rosier (Bredmose and Hansen, 1996, Le Bris et al., 1998, Marcelis-Van Acker, 1994), ou le chrysanthème (Zalewska et al., 2010). Tous constatent des différences de développement selon l'origine des bourgeons, soit sur le temps que met la bouture à fleurir et sur la morphologie (diamètre) de la tige fleurie (Bredmose and Hansen, 1996), soit sur le temps avant début de débourrement défini par (Timson, 1965), utilisé par Le Bris et al. (1998) soit encore sur l'aptitude à débourrer, qui diminue vers le bas de la tige (Le Bris et al., 1998).

Ces dernières grandeurs, semblables respectivement au temps de mi débourrement et à la proportion de bourgeons débourrés, que nous avons utilisés, peuvent être comparées à nos observations : Le Bris et al. (1998), de même que Bredmose and Hansen (1996), constatent un allongement du temps nécessaire au débourrement de haut en bas de la tige, accompagné d'une diminution de la proportion de bourgeons débourrés pour la partie inférieure de la tige, donc une certaine relation entre proportions de bourgeons débourrés et vitesse de débourrement. Le comportement des bourgeons de rosier est donc semblable à celui des bourgeons de canne à sucre, excepté pour le haut de la tige, qui ne présente pas de difficulté particulière chez le rosier où l'évolution des propriétés de bourgeons est donc monotone le long de la tige. Les bourgeons de tige de rosier utilisés par Le Bris et al. (1998) sont plus âgés, puisque les boutures proviennent de tiges ayant déjà fleuri.

Les travaux de Marcelis-Van Acker (1994) montrent l'influence du bourgeon apical et de la date de bouturage et un effet de l'âge du bourgeon sur les propriétés ultérieures de la pousse : outre le fait que le bourgeon doit être libéré de la dominance apicale et avoir un certain âge pour débourrer, un bourgeon libéré tôt de la dominance apicale ne donnera pas d'ébauches florales aussi rapidement qu'un bourgeon plus âgé.

4.2.2. Tentative d'explication du gradient observé pour la canne à sucre

Lorsque la partie sommitale de la tige est éliminée (trop jeune, développement non terminé), nous observons un gradient du haut vers le bas de la tige, les boutures du bas de tige débourrent en moyenne en nombre plus faible (proportion de débourrement, BBP, Tableau 7 et Tableau 8) et prennent plus de temps pour le faire (durée de débourrement, BBT, Tableau 7 et Tableau 8). Ce gradient est très léger au centre de la tige et beaucoup plus fort à la base, cette observation justifie la nécessité d'éliminer les extrémités de tige pour disposer de lots homogènes de bourgeons. Nos observations vont dans le sens que celles de Le Bris et al. (1998), qui expliquent que le gradient

basipète peut provenir d'une inhibition intrinsèque aux bourgeons ou être dû à des corrélations à courte portée.

Ces auteurs montrent que ce n'est pas une question d'âge des bourgeons puisque le gradient est le même sur la tige florale que sur le rameau (plus âgé) qui la porte. Le court délai de débourrement d'un bourgeon qui se trouve en position supérieure est typique de la paradormance (Lang et al., 1987), puisqu'elle est facilement réversible lorsque le bourgeon n'est plus soumis à la dominance apicale. L'inhibition augmente quand on descend le long de la tige et aboutit à une proportion et une rapidité de débourrement décroissantes du haut vers le bas de la tige. L'inaptitude à débourrer plus fréquente en bas de tige est, selon Le Bris et al. (1998), caractéristique de l'endodormance, elle est interne au bourgeon et décrite comme levée par le froid pour les arbres.

Finalement, le comportement des bourgeons de bas de tige de canne est similaire à celui des bourgeons de rosier (Le Bris et al., 1998). Les racines plus abondantes (non significativement) sur les boutures non levées de bas de tige pourraient être une expression de l'antagonisme hormonal connu depuis longtemps entre émission de feuilles et de racines, antagonisme qui a été montré par les expériences de Miller et Skoog (1953). Ceux-ci démontrent qu'il s'agit des actions antagonistes des auxines et des cytokinines et ils soulignent l'influence de leurs équilibres plutôt que de leur concentration (Müller and Leyser, 2011).

Au contraire, pour les bourgeons du haut de tige de canne, les faibles débournements observés n'ont pas de correspondance chez le rosier — en particulier pour les entrenœuds 3 et 4 de R570 à 24°C (Tableau 7) à proportion de débourrement de 1/5, très faible. L'hypothèse explicative d'une dominance apicale plus forte ne peut pas être écartée absolument, mais elle est contraire à l'hypothèse du gradient habituel le long de la plante et de la paradormance avancée par Le Bris et al. (1998) pour le rosier.

L'hypothèse trophique se traduirait en une teneur en sucres limitante : elle est en effet plus faible dans le sommet de la tige (Figure 30). Cette hypothèse ne peut pas être écartée, bien que la teneur en sucres des tissus soit déjà forte puisque c'est celle d'un tissu de stockage.

L'hypothèse d'organogenèse incomplète démontrée par Zamski *et al.* (1985) en haut de tige doit être examinée : dans notre expérimentation, la morphologie des bourgeons était normale, mais leur anatomie (organogénèse, vascularisation) n'a malheureusement pas été observée. Cependant, on peut raisonner sur l'âge de l'ensemble du phytomère (nœud, entrenœud, bourgeon, feuille). Si la feuille proche du bourgeon est adulte, l'entrenœud, lui, n'a pas encore fini sa croissance, donc le bourgeon n'est sans doute pas mature. Cette hypothèse de "maturité" de bourgeon est cohérente avec les expérimentations sur rosier, où au contraire la tige dont étaient extraites les boutures était mature puisqu'elle avait déjà fleuri (Le Bris et al., 1998). L'hypothèse la plus plausible pour expliquer les difficultés de débourrement des bourgeons de haut de tige de canne semble être celle de la jeunesse des tissus, non matures au moment du bouturage.

Les gradients de débourrement le long de la tige sont différents entre variétés. Pour R 570 à 24 °C, la différence de vitesse de débourrement entre les parties médianes est significative. Cela suggère l'idée d'un gradient plus marqué pour R570 (proportions de débourrement très variables) que pour R583. Pour cette dernière, les propriétés de débourrement sont très peu variables à 24°C, un peu plus à 18°C.

Pour les utilisations appliquées des variétés étudiées, la synchronisation de débournements meilleure et leur vitesse plus élevée pour R583 que pour R570 sont un avantage pour la culture de R583, adaptée aux zones de contrainte d'altitude, lors de l'installation de la culture, qui est une phase délicate en température basse.

Nos analyses justifient le choix des parties centrales des tiges pour les expérimentations ultérieures, les bourgeons à comportement significativement différent sont éliminés, les bourgeons restant ont des comportements comparables.

4.3. Effets de la température, différences entre variétés

L'observation des débournements de bourgeons de plusieurs variétés dans plusieurs environnements thermiques a pour but principal de montrer la stabilité des comportements, quelles que soient les conditions. Elle permet aussi de montrer des différences entre les variétés. Alors que les proportions finales de débourrement sont peu différentes entre traitements et entre variétés une fois que les bourgeons ont été sélectionnés, les durées sont différentes entre variétés : R583 a une durée de débourrement plus courte que les deux autres variétés R570 et R577, alors que dans l'essai 2, les différences sont faibles entre les variétés R570 et R577 (un seul jeu de conditions de milieu). Notre travail permet de montrer des comportements variétaux différents selon la température, comportements étudiés dans le chapitre suivant.

4.4. Conclusion

Une implication essentielle des précédents résultats est l'utilisation de boutures courtes et à un seul bourgeon (un seul œil), tous les bourgeons provenant de la partie médiane de la tige ayant de bonnes aptitudes au débourrement.

Sur un plan plus fondamental, ce travail a montré un comportement des bourgeons semblables à ceux d'autres plantes qui se bouturent, avec un gradient de propriétés de développement assez faible dans la partie centrale de la tige de canne à sucre. Ce comportement est observé dans diverses conditions de milieu (plusieurs températures) et pour diverses variétés. Il existe des différences entre variétés pour les propriétés de débourrement, en particulier les gradients liés à la topophysie sont plus ou moins marqués, selon les variétés, quoique toujours faibles dans la partie centrale de la tige..

Résumé Chapitre II

Aptitude au débourrement – qualité du matériel végétal

Etat de l'art et objectifs

Chez la canne à sucre, plante à reproduction végétative, le débourrement des bourgeons est la première étape de l'installation de la culture ou du redémarrage après récolte. Or, pour toutes les plantes, et chez les graminées en particulier, le potentiel de développement d'un bourgeon peut être différent selon sa position d'origine le long de la tige. La question est : la position d'origine des bourgeons utilisés comme boutures ou d'autres propriétés de ses dernières peuvent-elles influencer les propriétés de débourrement des bourgeons ?

Méthode

Le débourrement de bourgeons de trois variétés réunionnaises R570, R577 et R583 à température constante (deux valeurs : 18 °C et 24 °C) et fluctuante en serre (25,3 °C +/- 3,1 °C) a été observé tous les jours. Les combinaisons température*variété sont nommées "traitements". En fin d'expérience, les bourgeons non levés sont disséqués et examinés afin d'identifier les causes expliquant l'absence de débourrement.

Résultats principaux

Méthodologiques

La sélection préalable de boutures à bourgeon sain est nécessaire pour évaluer expérimentalement les capacités des variétés à lever. Les boutures à un seul bourgeon offrent une très bonne qualité de débourrement.

Le débourrement peut être caractérisé par la proportion finale de bourgeons débourrés et la durée moyenne de débourrement, exprimée en jours à une température donnée.

Selon les variétés, le nombre de bourgeons disponibles sur des tiges de même âge est variable, ce qui nécessite de comparer des bourgeons de même position relative le long de la tige et non des bourgeons de même rang et nécessite de définir des sections équivalentes de tiges. De plus, la variabilité individuelle de durées de débourrement nécessite aussi de comparer des moyennes entre lots d'individus. Cela conduit à utiliser des moyennes des variables faites sur des portions de tige (section) et sur l'ensemble des individus de l'échantillon.

Résultats biologiques

Dans l'expérimentation, les proportions de bourgeons sains sont différentes entre les variétés, ce qui conduit à penser que certaines variétés sont plus sensibles aux attaques de bioagresseurs que d'autres.

Pour tous les traitements étudiés, les bourgeons issus des extrémités de tige (4 du haut et 4 du bas de tige) ont des proportions et des durées de débourrement statistiquement différentes de ceux des parties médianes de la tige, les extrémités ont tendance à avoir des proportions de débourrement plus faibles et elles ont des durées plus longues. Pour les parties médianes, apparaît un léger gradient du haut vers le bas, les propriétés étant meilleures en haut. Cela conduit pour les expérimentations ultérieures à n'utiliser que les parties médianes de tiges, puisque leurs propriétés de débourrement peuvent être considérées comme homogènes sur cette partie.

Le raccourcissement des boutures n'a pas d'influence sur la phase de débourrement.

Comme la teneur en sucres des boutures et leurs propriétés de débourrement évoluent de façon très différente le long de la tige, la teneur en sucres ne peut pas expliquer les gradients observés. Les différences de propriétés de débourrement le long de la tige peuvent être expliquées par des gradients hormonaux liés à la durée de l'influence du bourgeon apical subie par les bourgeons, c'est-à-dire à leur âge respectif.

Conclusion

Des expérimentations de débourrement de bourgeons peuvent être réalisées avec des boutures d'un seul bourgeon, de taille réduite. Les comparaisons de débourrement à différentes températures nécessitent d'utiliser des boutures triées, saines, et homogènes, c'est-à-dire provenant de la partie médiane de la tige-mère. Les bourgeons de la partie supérieure de la tige (entrenœuds à croissance non terminée) et bourgeons de la base de la plante devront être écartés des échantillons.

Chapitre III : Débourrement

Les grands processus d'installation d'une culture bouturée comme la canne à sucre sont le débourrement et la levée du bourgeon planté, puis l'émission de feuilles (préformées puis néoformées), l'émission de talles et l'allongement des tiges primaires et secondaires. Des racines sont émises simultanément. Cet ensemble de processus permet d'arriver à un couvert considéré comme installé lorsqu'il atteint un indice foliaire proche de son maximum. C'est à cette période d'installation de la partie aérienne du couvert que s'intéresse la prochaine partie du texte.

Ce chapitre traitera de la phase de débourrement levée et le chapitre suivant de la mise en place de la surface foliaire.

1. Introduction

L'implantation de la culture est une étape essentielle et sa réalisation dans un temps bref est un atout pour le bon déroulement des étapes suivantes particulièrement en environnement contraint. A partir de ce principe, nous souhaitons : (i) caractériser la contrainte que représentent les basses températures durant la période d'implantation de la culture, et (ii) définir des critères d'adaptation des nouvelles variétés.

La phase d'implantation de différentes variétés de canne à sucre en condition de basses températures a finalement peu été étudiée jusqu'à récemment alors même que l'on assiste à une extension des cultures vers des terrains en altitude donc plus frais. La tolérance variétale à cette contrainte thermique mérite d'être explicitée. La caractérisation de génotypes mieux adaptés représente un pas vers la compréhension des phénomènes en jeu et vers la mise au point d'outils d'aide à la sélection.

Les questions de recherches peuvent se décliner de la manière suivante :

- La qualité des boutures, notamment liée à l'histoire des plantes-mères influence-t-elle les vitesses et les étalements de débourrement ?
- Existe-t-il une variabilité génétique des paramètres du débourrement (latence, vitesse, dispersion dans le temps) ainsi que des seuils de températures associés ?

2. État de l'art

2.1. La bouture comme matériel végétal

Les questions de qualité du matériel végétal ont été abordées dans le Chapitre II. Nous avons présenté les aspects de topophyse (position de la bouture le long de la tige-mère pour deux variétés à deux températures constantes) et de taille de bouture (raccourcie ou normale pour trois variétés à une température fluctuante) vis-à-vis de la capacité de levée et de la durée. Par qualité de la bouture, nous considérerons dans ce chapitre principalement la provenance (altitude ou plaine) ainsi que l'âge des tiges-mères tronçonnées devant fournir les boutures. Concernant l'âge des boutures

les auteurs préconisent l'utilisation de boutures issues de plants de 6 à 7 mois (Lemaire and Robert, 1973), 6 à 13 mois (Fauconnier and Bassereau, 1970) ou encore de 8 à 10 et de 12 à 15 mois selon les régions « Northern » ou « Midlands » en Afrique du Sud (Anonymous, 2011).

Le type de sol d'origine des boutures n'explique pas les performances de levée (Van Dillewijn, 1952). *A contrario*, l'état sanitaire différent de boutures provenant de terrains en altitude et de plaine s'est avéré être l'explication d'une moins bonne levée à Formose pour le virus de la Mosaïque comme à Java pour la maladie de Sereh (Van Dillewijn, 1952).

Afin d'éviter les effets d'inhibition dus à la dominance apicale (le Grand, 1972) cité par (Malik et al., 1990), on décide d'utiliser des boutures constituées d'un seul bourgeon. La quantité de sucre présente dans les boutures réduites à 4 cm de part et d'autre de l'anneau radiculaire est suffisante pour que le bourgeon lève (Venkatraman, 1926, Martinho et al., 2010). Lors du phénomène de maturation de la tige, la différence de maturité entre les entrenœuds du haut de la tige (plus jeunes et avec une teneur en sucre plus faible) et ceux du bas de tige (plus âgés et avec une teneur en sucre plus élevée) s'estompe par maturation des entrenœuds du haut de tige (Van Dillewijn, 1952).

En condition de température fraîche, Clements (1980), sans préciser de valeur, signale que le phénomène de dominance apicale entraîne la levée d'un seul bourgeon par bouture, celui situé à l'origine le plus haut sur la tige.

2.2. Comptabiliser la température

L'utilisation de la somme de températures a pour but de normaliser les durées de déroulement de processus, ici le débourrement. Connaître la somme de degré.jour nécessaire pour atteindre une phase phénologique permet d'obtenir deux types d'informations principales : soit pour estimer la date de réalisation d'un stade dans des conditions connues pour une variété, soit pour comparer plusieurs variétés.

L'utilisation de la somme de températures se base sur le principe que l'effet de la température est linéaire, c'est-à-dire qu'un degré a le même effet quelle que soit la température à laquelle il s'ajoute. Cependant, il y a toujours une limite inférieure à cette règle. Le débourrement ne peut s'effectuer que lorsque la somme de degré.jour accumulés est suffisante. Il est nécessaire de définir un seuil au-dessus duquel s'applique cette règle.

Le calcul des seuils au-dessus desquels seront cumulées les sommes de températures a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux, étant donné l'importance de la question de la durée de végétation d'une culture pour sa production.

Ces méthodes peuvent être groupées en deux familles :

Pour la première famille, la méthode consiste à affecter la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression associant vitesse de développement (inverse de la durée) pour un stade étudié et température moyenne durant ce stade. Certains auteurs prennent pour référence la vitesse moyenne du stade complet, la moyenne des vitesses à différent pas du processus, certains la vitesse maximum, enfin pour d'autres la vitesse correspondant au moment où l'évènement qui caractérise le processus est le plus fréquent comme le « pic » de levée d'une population de bouture (Smit, 2011).

Pour la seconde famille, il existe quatre principes de calcul pour estimer statistiquement les valeurs de températures seuil (Arnold, 1959, Bonhomme, 2000, Normand and Léchaudel, 2006). Ils consistent à minimiser : (i) l'écart-type des sommes en **degré.jour** des séries de données, (ii) l'écart-type des sommes **en jour** des séries de données, (iii) le coefficient de variation des écarts en jour, (iv) le coefficient de corrélation entre les sommes de degré.jour et les températures moyennes des différentes séries.

La première est mieux adaptée à la comparaison entre variétés, tandis que la seconde est mieux adaptée à l'estimation de dates de réalisation de stades (Bonhomme, 2000). Bonhomme (2000) décrit les limites de la notion de température seuil ; il explique que si leur utilisation est primordiale, la linéarité entre développement et température n'est vraie que pour une gamme limitée de températures. Au voisinage des températures seuils, les lois du Q10 appliquées aux sommes de températures journalières correspondent par exemple mieux à la réalité. Il insiste sur la nécessité pour définir les températures seuil, de bien écarter tout paramètre externe parasite tel que le photopériodisme, l'alimentation hydrique et l'état nutritionnel. Dans le cas d'utilisation de modèles non-linéaires, l'utilisation de lois mathématiques « flexibles » ayant recours à peu de paramètres sont recommandées (Yin et al., 1995). Enfin il faut prendre soin d'utiliser pour référence les températures les plus proches des organes réellement impliqués dans le phénomène étudié.

Pour ce qui concerne la canne à sucre, Mather (1941) définit le premier une température seuil de 18.3°C, O'Callaghan (1994) cité par Liu (1998) ne différencie pas non plus de température seuil selon les stades et donne une valeur générale de 8°C. Pour la canne à sucre comme pour d'autres plantes, les valeurs calculées par la plupart des auteurs diffèrent selon les stades. Liu *et al.* (1998) calculent pour la variété australienne Q138 des températures seuils respectives de 12,4°C pour l'émergence de talles, 16,9°C et 18,9°C l'élongation des tiges. Inman-Bamber (1991) utilise 12°C pour l'apparition de feuilles, et trouve 16°C pour l'émergence de talles (1994), enfin Martiné (2003) calcule celle d'apparition de feuilles pour la variété R 570 à 12,04°C.

Pour le stade de débourrement-levée, deux auteurs (Inman-Bamber, 1994, Liu et al., 1998) citent Barnes (1964) qui estime la température seuil à 12°C. Liu *et al.* (1998) obtiennent 11,6°C pour la variété australienne Q138 et Morandini (2005) 10,5°C pour la variété TUC77-42. Van Dillewijn C. (1952) relate qu'il existe une réponse variétale au facteur température. En Australie, le caractère variétal des réponses se confirme pour deux variétés (Liu et al., 1998), en Argentine pour quatre variétés (Romero et al., 2001, Romero et al., 2005). Plus récemment Smit (2011) estime les températures seuils de levée à 16,8°C, 17,8°C et 18,1°C pour les variétés N27, N16 et NCo376 respectivement. Wilcox et al. (2000) précisent que la vitesse de levée est une caractéristique variétale avec, par exemple, des différences entre la variété Q124 particulièrement lente, pénalisée en période fraîche comparativement à Q151 et Q170 plus rapides. Ils constatent que ce caractère n'est pas pris en compte dans le schéma de sélection australien.

3. Matériel et méthode

Le but est de qualifier et quantifier si possible, l'influence de la température sur le processus de débourrement. On aura pris soin, depuis l'établissement de notre protocole jusqu'à l'analyse des données de séparer le plus possible ce qui est d'ordre purement génotypique de ce qui a trait à la qualité des boutures (âge, position sur la tige, taille, origine ...), à l'état hydrique ou encore nutritif du

substrat qui pourraient interférer sur un processus dont on souhaite une représentation directement liée aux qualités intrinsèques de la variété.

Pour ce faire, nous avons choisi 8 variétés aux zones d'adaptation et performances de production variées.

L'observation à 4 températures constantes (exp. 1) du phénomène de débourrement devra nous permettre d'appréhender l'effet de la température sur chacune d'elle, d'évaluer leur réponse individuelle et de les comparer au travers d'un modèle construit. Les dynamiques modélisées pour chaque variété sont alors utilisées pour être comparées à d'autres séries de données observées dans deux essais (exp. 2 et exp. 3) en conditions de températures constantes en chambre climatiques (16 séries) puis dans deux essais (exp. 4 et exp. 5 - Photo 5page 136) à températures fluctuantes en serre ou au champ (13 séries). Ce travail nous permet d'estimer le modèle moyen obtenu par variété ainsi que de rechercher des explications sur les écarts éventuels entre les prédictions du modèle et les dynamiques observées.

L'étape suivante consiste à évaluer l'effet de la qualité de la bouture qui varie en fonction de l'origine des pieds-mères sur la levée. La notion de qualité est décomposée en termes d'origine, d'âge chronologique et enfin de maturité des tiges-mères caractérisée par une mesure de leur profil de teneur en sucre. Nous tentons alors de mettre en évidence l'incidence de ces effets sur le comportement des bourgeons en levée.

3.1. Des variétés contrastées

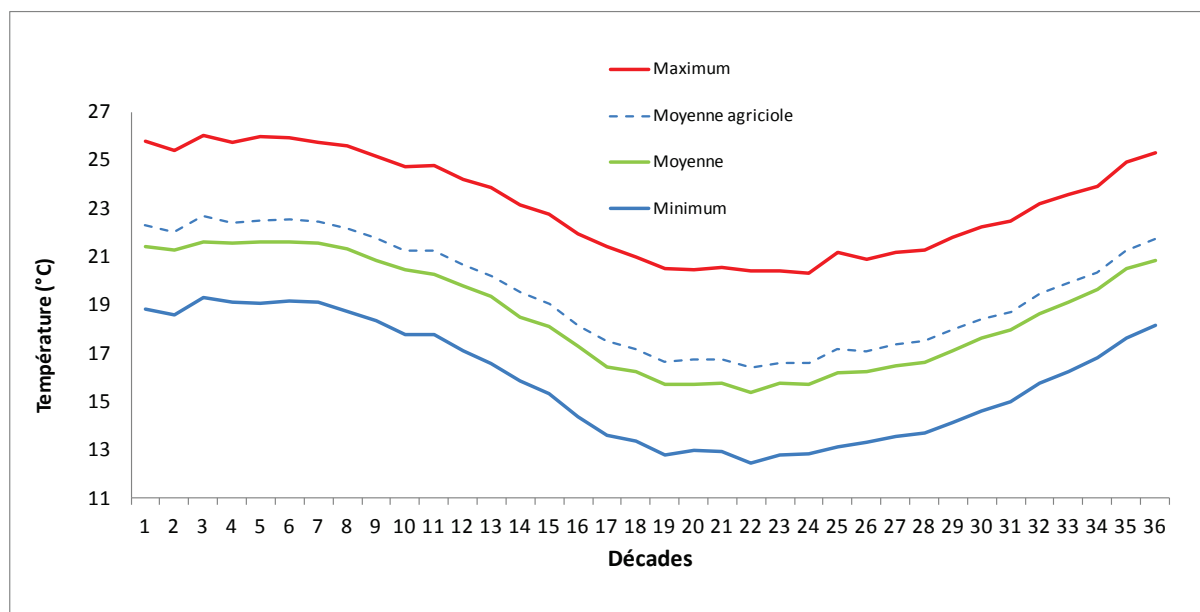
Dans le souci de représenter la diversité existant entre les variétés présentes à La Réunion, notamment pour ce qui est de leur capacité à lever, 7 variétés sont retenues dans notre jeu de données. A La Réunion, la sélection d'une nouvelle variété nécessite environ 15 ans, durée à la fin de laquelle correspond sa « libération », c'est-à-dire sa mise à la disposition des planteurs. La libération des variétés retenues dans notre jeu de données s'échelonne sur une période de plus de 30 ans. Nous travaillons sur un jeu constitué de variétés anciennes et récentes recommandées pour des climats très contrastés et diversement adaptées aux zones d'altitude (Tableau 10). Une huitième variété exotique ancienne en provenance d'Afrique du Sud, très présente dans la littérature, est aussi retenue.

Tableau 10. Année de libération des variétés réunionnaises et sud africaines, zone d'adaptation (sources eRcane, Sasri), présence dans essais

Variété	Année de libération	Zone d'adaptation	Essai
R570	1978	Très large zone d'adaptation : zone sèche, irriguée, humide. Pas recommandée aux altitudes supérieures à 550m dans Ouest et Sud et à 300m dans l'Est. Elle reste la variété la plus présente et la plus replantée jusqu'à la saison 2009-2010 y compris dans les Hauts.	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C 18 et 24°C 16 et 18°C Au champ 2sites
R577	1987	Entre 400 et 700m dans l'Ouest et le Sud de l'île. Zone d'adaptation réduite : région sèche, non irriguée de l'Ouest d'altitude moyenne à haute et du Sud.	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C Au champ 2 sites
R579	1993	Régions littorales humides ou irriguées. Sa plantation est à proscrire dans les zones sèches ou froides. Fort rendement en canne dans les zones de basse altitude et humide (Nord-Est et Est) ou sous irrigation.	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C 16 et 18°C (x2 provenance)
R581	2006	Région Sud Ouest, altitude moyenne (à partir de 300m), en zones non irriguées. Région d'adaptation réduite des Avirons à Petite-Île. A proscrire en zone humide. Variété rustique bien mise en valeur sur les terrains difficiles (pentes)	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C
R582	2006	Littoral Est ou littoral Ouest irrigué, zone favorables du Grand Sud Variété à large zone d'adaptation	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C 16 et 18°C (x2 provenance)
R583	2008	Hauts sous le vent (zone sèches et non irriguées), à planter au dessus de 500m d'altitude	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C 18 et 24°C 16 et 18°C Au champ 2sites
R585	2010	En priorité dans les zones difficiles et dans les Hauts de l'Est et du Sud, à proscrire des zones sèches. Zone d'adaptation plutôt large avec de bons résultats sur l'ensemble de l'île.	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C Au champ 2 sites
NCo376	1955	Variété issue d'un croisement réalisé en Inde (Coimbatore) et d'une sélection en Afrique du sud, elle a connu un grand succès en production et comme géniteur et reste adaptée aux zones littorales d'Afrique du Sud.	Chambres clim. 15-19-23 et 28°C Au champ 2 sites

4. Choix et suivi des températures d'expérimentation

Les Hauts sont confrontés à des températures relativement fraîches, particulièrement durant l'été austral pendant lequel les minima descendent en dessous de 13°C, les moyennes vraies et les moyennes agricoles ($\text{Min}+\text{Max}/2$) frôlent respectivement les 15°C et 16°C (Figure 32). Nous avons choisi pour nos essais une gamme de température comprise entre 15°C et 28°C représentant la gamme que l'on pourra trouver au champ.



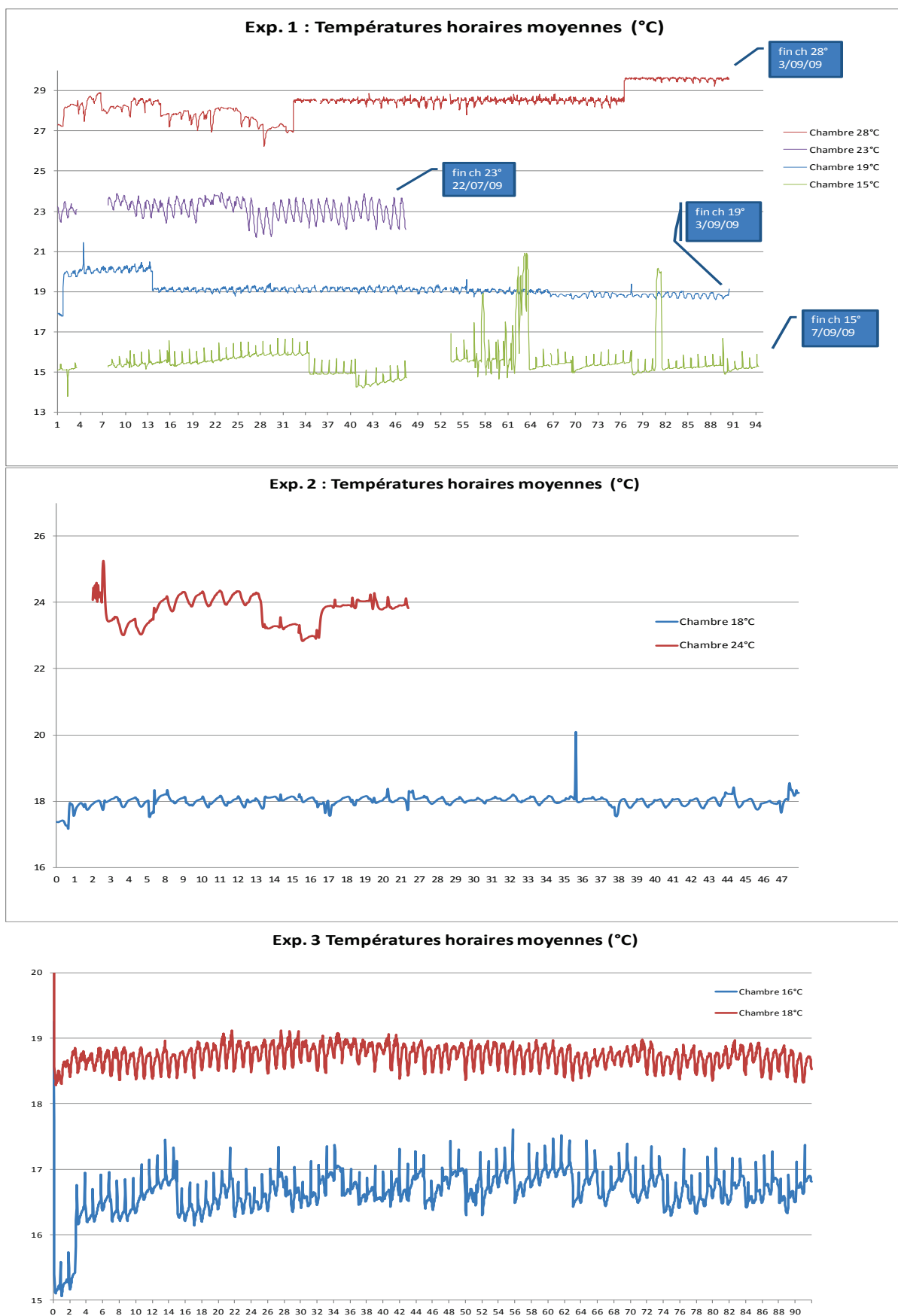
Minimum, moyenne, moyenne agricole $[(\text{min}+\text{Max})/2]$, Maximum en °C pour la période 2001-2011.

Source : propriété Cirad - Météo France

Figure 32. Températures moyennes décadales de l'air aux Colimaçons (790 m)

Cette gamme étendue répond à la contrainte citée par Bonhomme (2000) nécessaire pour faire apparaître différentes vitesses du processus de débourrement. Les températures de référence seront mesurées à l'aide de sonde placées en terre à l'intérieur des pots contenant les boutures.

Pour chacun des essais en chambre ou en serre, les boutures sont réparties en 4 séries à 15°C, 19°C, 25°C et 28°C (exp. 1), en 2 séries à 18°C et 24°C (exp. 2) ou encore en 2 séries à 16°C et 18°C (exp. 3) dans des chambres climatiques aux températures constantes (Figure 33), garantissant des conditions d'humidité favorables au déclenchement du débourrement des bourgeons, propices à la levée.

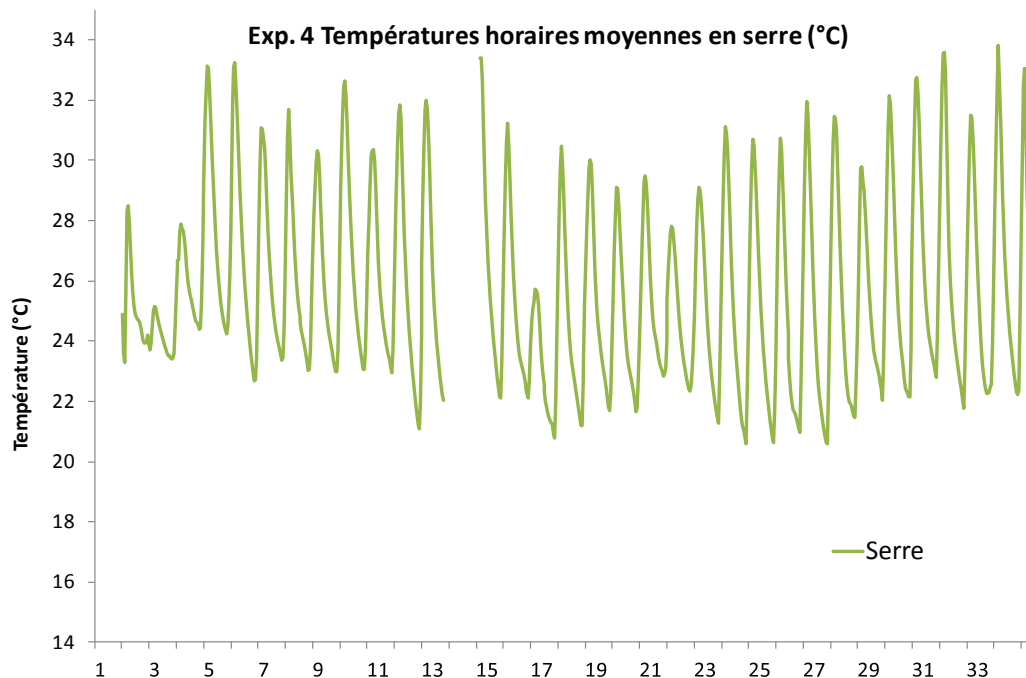


Températures en terre à proximité des boutures (exp.1, au cours du processus de débourrement en jour après mise en chambre.

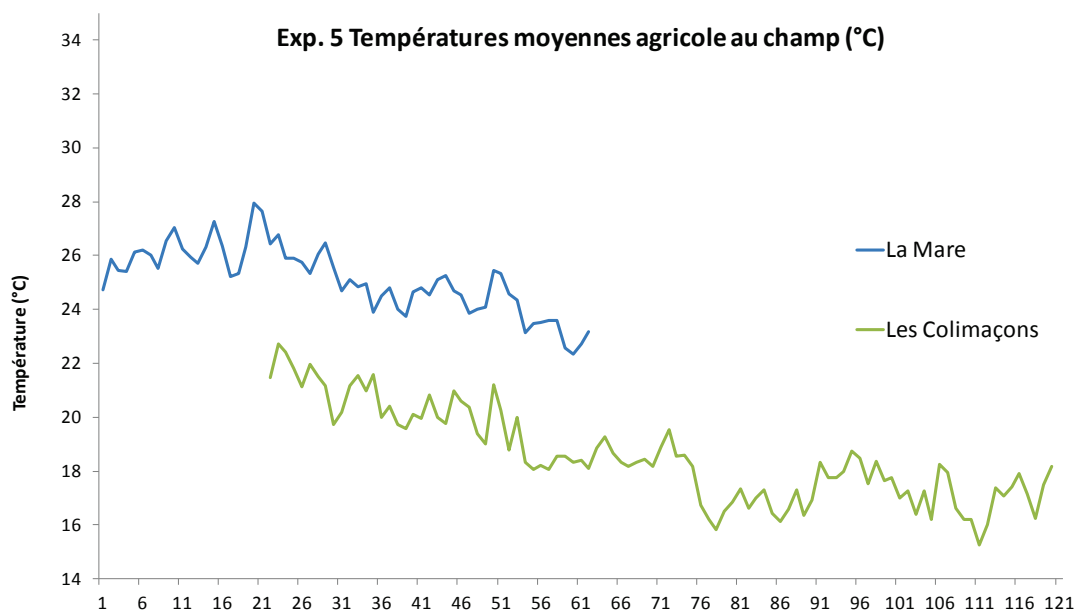
Figure 33. Exp.1, exp.2 et exp.3 : Moyennes horaires des températures en chambres climatiques

Les conditions de températures fluctuantes correspondent à deux essais, le premier en serre (exp. 4) et le second au champ (exp.5) sur 2 sites (Figure 34A et B).

A



B



A : en serre et B : agricoles $[(\text{Min}+\text{Max})/2]$ au champ (Exp.5) sur deux sites à proximité des boutures au cours du processus de débourrement en jour depuis la plantation.

Figure 34. A : Exp.4 et B : exp. 5 : Moyennes journalières des températures fluctuantes

4.1. Choix et préparation des boutures

Pour réduire les échecs de levée, comme les a observés Clements (1980), indirectement liés aux caractéristiques variétales, des boutures d'un seul bourgeon sont utilisées. Ces boutures ont été sélectionnées pour leur bon état sanitaire, à partir de parties médianes de tiges-mères (Cf. topophyse du Chapitre II) cultivées, toutes variétés confondues, dans un même champ impliquant une conduite agronomique commune en conditions irriguées et fertilisées.

Pour éviter d'introduire des différences entre lots de boutures, les tiges sont prélevées à la même date et les boutures découpées ont été conditionnées exactement de la même manière. Cependant, deux variétés (NCo376 et R582) n'ont pas subi le même historique, car elles proviennent de collections spécifiques.

Suite aux résultats obtenus dans le chapitre II, les boutures d'un seul bourgeon réalisées pour les essais comprennent les bourgeons de tiges à partir du bourgeon n°5, on ôte les 4 bourgeons du bas de tige ainsi que tout bourgeon dont l'état sanitaire ne serait pas optimum (pique d'insecte, bourgeon abimé).

Enfin, pour tester l'influence de l'historique des boutures, des lots ont été conditionnés différemment (plantes-mères à différentes altitudes). Les boutures qui ont été utilisées pour les exp. 1, exp. 2 et exp. 4 proviennent de cannes levées en chambres climatiques puis transplantées aux champs (sauf pour NCo376 et R582 de l'exp. 1 préparées à partir de tiges de canne en repousses), tandis que celles qui sont utilisées pour les exp. 3 et exp. 5 ont levé en serre puis ont été transplantées au champ avec deux modalités pour l'exp. 3 (une partie des cannes provient des Hauts aux Colimaçons à 850 m) et l'autre des Bas à La Mare à 50 m - Tableau 11).

Les lots de boutures ont des âges (cumulés entre stade de levée et période de croissance élongation après transplantation éventuelle) étalés entre 9 à 15 mois comparables à ceux présents dans la littérature. Dans tous les cas, les lieux et âges des tiges mères sont présentés (Tableau 11).

4.2. Mesures

4.2.1. Mesures de la levée

Pour chacune des séries de 20 à 32 bourgeons mis en condition de levée par chambre, on mesure le temps nécessaire à la pousse de 1 cm hors du sol du bourgeon (Smith et al., 2005). À partir des observations quotidiennes l'évolution, au cours du temps (en jour ou degré.jour) du taux de levée en pourcent des bourgeons plantés de chaque série est établie (Cf. Chap II : 2.3 page 59).

Le processus est considéré être achevé lorsqu'aucune nouvelle pousse n'apparaît durant plusieurs jours consécutifs¹⁶. Pour les besoins de la modélisation (convergence du modèle au plateau) et afin d'équilibrer le nombre et l'intervalle entre les données aux plateaux entre températures, on duplique 5 fois la valeur du dernier taux de levée observé à une distance de 50 degré.jour.

¹⁶ Pour les exp. 1 et exp.2 la durée était de 10 jours, pour l'exp.3 cette durée a été allongée à 50 jours.

Le processus de débourrement d'une variété pourra ainsi être caractérisé par sa dynamique propre de levée. Les valeurs suivantes pourront être obtenues : (i) le taux maximum de levée, (ii) des durées (en jour ou degré.jour) correspondant à des stades caractéristiques comme la demie-levée : Θ_{50} , la durée nécessaire en degré.jour au dessus de la température seuil pour que la moitié des bourgeons levés lève, ou encore (iii) des durées illustrant des comportements comme l'étalement de la levée : Θ_{25-75} , la durée nécessaire pour passer du stade de 25 % à 75 % de levées des bourgeons levés.

4.2.2. Signification de la teneur en sucre

La teneur en sucre, exprimé en unités Brix (fraction de sucres solubles dans la matière sèche, Cf. Chapitre II), évolue au cours de la vie de la plante. Le sucre s'accumule progressivement à partir des entrenœuds de la base de la tige, jusqu'à atteindre un maximum. Tout se passe donc comme si la tige se remplissait de sucres par sa base. Lorsque les teneurs en sucres de tous les entrenœuds deviennent semblables, on considère que la tige est remplie et on parle alors de "maturité" de la tige, correspondant à la fin du remplissage des entrenœuds qui la compose. La maturité de la tige-mère sera plus particulièrement abordée dans notre étude. Cette maturité sera illustrée par le profil de mesures des tiges-mères à l'origine des boutures à un seul bourgeon utilisées pour les expériences. Nous avons choisis de numéroter les bourgeons en commençant par le haut de la tige afin de privilégier les comparaisons entre boutures issues du même rang, ayant sensiblement le même âge.

Pour l'expérience 2, les boutures utilisées respectivement dans les chambres à 18°C et 24°C ont été prélevées à quelques jours d'intervalle contrairement à celles des exp. 1 et exp. 3 pour lesquelles les boutures ont été réparties au fur et à mesure des prélèvements de tiges au champ dans chacune des chambres.

Tableau 11. Historique de l'accumulation de température et de rayonnement des pieds-mères des boutures utilisées pour les essais exp.1 à exp.5.

Essai	Variétés	Stades										Total			
		Levée						Elongation - Croissance							
		Lieu	Dates	Durée (j)	Somme degrés jour	Somme rayonnement en MJ/m2	transplantation	Lieu	Dates	Durée (j)	Somme degrés jour	Somme rayonnement en MJ/m2	Durée (j)	Somme degrés jour	Somme rayonnement en MJ/m2
exp. 1 Chambres 15, 19, 23 et 28 °C	R570,R577,R579 R581,R583,R585	chambre clim 20°	du 26 avril 2008 au 4 juin 2008	40	800	NA		petite collection La Mare	du 5 juin 2008 au 9 juin 2009	369	9 000	7 500	409	9 800	7 500
	R582						eRcane La Mare	du 1er Août 2008 au 9 juin 2009 (repousse)	313	7 850	6 550	313	7 850	6 550	
	NC0376						Bassin Martin St Pierre	Août 2007 (repousse)	362	8 100	7 250	362	8 100	7 250	
exp. 2 Chambres 18 et 24°C	R570, R583	chambre clim 20°	du 26 avril 2008 au 4 juin 2008	40	800	NA	Transplantation	petite collection La Mare	du 5 juin 2008 au 11 février 2009	252	6 019	5 200	292	6 800	5 200
exp. 3 Chambres 16 et 18 °C	R579, R582	Bretagne (serre)	du 29 avril 2009 au 8 juillet 2009	70	1 600	490		collection La Mare LES BAS	du 8 juillet 2009 au 5 juillet 2010	348	8 700	6 750	418	10 300	7 240
	R570, R579, R582, R583	Bretagne (serre)	du 29 avril 2009 au 22 juin 2009	55	1 500	385	collection Les colimaçons LES HAUTS	du 23 juin 2009 au 13 juillet 2010	386	7 400	4 985	441	8 900	5 370	
exp. 4 Serre	R570, R577, R583	chambre clim 20°	du 26 avril 2008 au 4 juin 2008	40	800	NA		petite collection La Mare	du 5 juin 2008 au 6 avril 2009	306	7 400	6 400	346	8 200	6 400
exp. 5 Champ La Mare & Les Colimaçons	R570, R577, R583, R585, NC0376 La Mare	Bretagne (serre)	du 29 avril 2009 au 8 juillet 2009	70	1 600	490		collection La Mare	du 8 juillet 2009 au 15 avril 2010	279	7 000	5 700	349	8 600	6 190
	R570, R577, R583, R585, NC0376 Les Colimaçons	Bretagne (serre)	du 29 avril 2009 au 8 juillet 2009	70	1 600	490		collection La Mare	du 8 juillet 2009 au 6 mai 2010	300	7 500	6 100	370	9 100	6 600

4.3. Modélisation du processus de débourrement

Le modèle non-linéaire utilisé pour la levée d'une population de graines par Larsen et Bibby (2005) s'appuie sur l'équation de la loi de Weibull qui est pertinente pour décrire le passage rapide d'individus d'un état à un autre avec un état initial à zéro. De fait, elle est notamment adaptée pour représenter le processus de germination (Brown and Mayer, 1988). Les cinq paramètres de cette équation sont : la latence (z), la vitesse maximum de levée (k) au point d'inflexion de la courbe, le taux maximum de levée (m) et un paramètre (c) donnant une dissymétrie à la courbe (début et fin de distribution différemment étalées) par rapport à son point d'inflexion. Le temps (t) est remplacé par le temps thermique calculé au-dessus d'un seuil T_b : $(\Sigma(T-T_b))$.

En résumé, on modélise le pourcentage de levée des boutures plantées en fonction du temps et de la température, en utilisant la notion de somme de températures (Équation 1). Le remplacement de la variable temps par la variable "somme de températures au-delà d'un seuil" permet d'introduire le terme correspondant à la température seuil dans l'expression, il sera estimé simultanément aux quatre paramètres.

Modèle simple :

$$y = m \times (1 - e^{- (k \times (x_1 - x_2 \times T_b - z))^c}) \times 100 + \varepsilon$$

Avec y = % de levée x_1 = Somme de degré.jour accumulés x_2 = Nombre de jours ε : terme d'erreur

Équation 1. Equation du modèle simple, appliquée aux lots de boutures d'une même variété.

Les cinq paramètres de cette équation propre à une variété et commune aux chambres sont : la température seuil en °C (T_b), la latence (z), la vitesse maximum de levée (k) au point d'inflexion de la courbe, le taux maximum de levée (m) ainsi qu'un paramètre donnant une dissymétrie à la courbe (début et fin de distribution différemment étalées) par rapport à son point d'inflexion (c). Le temps t est remplacé par le temps thermique calculé au-dessus d'un seuil T_b ($\Sigma(T-T_b)$).

D'une part, nos données sont des cumuls quotidiens de recensements de levées de bourgeons ; les mesures successives intègrent par conséquent le résultat des données précédentes. D'autre part, les lots de boutures sont en principe les plus homogènes possible, mais il n'est pas surprenant, étant donné la variabilité constatée qu'il existe des différences (Figure 28 et Tableau 4). Les données ainsi bâties à partir de lots de boutures d'une chambre ne sont pas indépendantes. Elles sont liées entre elles dans le temps au sein d'une chambre qui a son propre environnement (température, hygrométrie¹⁷). Enfin le plan d'expérience implique le recours à des échantillons de taille différente, les tiges ne comportent pas le même nombre de bourgeons donc de boutures potentielles et les boutures non saines ont été exclues des analyses (Tableau 3 et Figure 28). Ces effectifs différents rendent les données déséquilibrées. Afin de tenir compte de la corrélation existant entre les observations issues d'une même chambre climatique et des échantillons de taille différente, nous avons choisi d'utiliser un modèle non-linéaire à effets mixtes (Pinheiro et al., 2011)¹⁸ qui intègre des effets à la fois fixes mais aussi aléatoires. L'introduction de la chambre climatique comme variable aléatoire nous permet de modéliser correctement nos données tout en estimant la variabilité induite

¹⁷ La terre des pots contenant les boutures a été arrosée puis essuyée avant la mise en chambre. Le fonctionnement des chambres à différentes températures a probablement induit des humidités ambiantes différentes, biais d'expérimentation qui a été en partie atténué par la réalimentation régulière des pots en eau.

¹⁸ L'équation qui représente le comportement d'une variété dans tous les milieux est ainsi mieux estimée que par modèle classique qui suppose indépendance des données et échantillons de même taille.

par les chambres climatiques elles-mêmes. Le modèle à effet mixte peut ainsi être décomposé en deux parties :

La première partie appelée partie fixe du modèle repose sur un modèle simple ou modèle commun. Celui-ci ajuste au mieux l'ensemble des lots de boutures d'une variété, toutes températures de chambre confondues. L'ajustement¹⁹ obtenu prend en compte les parties aléatoires.

La seconde, partie aléatoire modélise la variabilité liée aux chambres climatiques par rapport au modèle commun, c'est-à-dire à la partie fixe du modèle. Chaque paramètre du modèle est estimé par une partie fixe et éventuellement une partie aléatoire si l'ajout de cette dernière augmente la vraisemblance de celui-ci par rapport aux données observées. Concrètement, le modèle à effets mixtes nous permet d'obtenir des ajustements par chambre climatique qui seront à l'origine d'un modèle simple, commun aux chambres, propre à chaque variété.

Lors de la construction des modèles par chambre, si par exemple les taux de levées maximum - paramètre (m) en fonction des sommes de degrés accumulés - sont différents selon les chambres climatiques, nous introduirons un effet aléatoire de la chambre sur ce paramètre. Nous aurons donc, en plus de la variable température intégrée dans l'équation, un effet aléatoire de la chambre climatique sur ce paramètre. De plus, comme l'effet de la chambre climatique sur le paramètre ne s'exprime pas de façon linéaire (c'est à dire que la chambre climatique à 28°C montre parfois un taux de levée final inférieur à celui obtenu dans la chambre climatique à 19°C), l'effet aléatoire sera introduit sous forme de variables qualitatives. Cet effet aléatoire²⁰, qualitatif par chambre (valeur codée selon le nombre de niveau de températures retenu, non ordonné), sera intégré au modèle (Équation 2) s'il améliore la précision entre la prédiction et les observations. La même démarche sera réalisée pour chacun des paramètres. Il est entendu que la température seuil (Tb) sera estimée pour chaque variété mais correspondra à une seule et unique valeur quelque soit la chambre climatique.

Modèle avec effets aléatoires :

$$y = (m + ma) \times (1 - e^{-((k+ka) \times (x_1 - x_2 \times Tb - (z+za)))^{(c+ca)}}) \times 100 + \varepsilon$$

Avec y = % de levée x_1 = Somme de degrés accumulés x_2 = Nombre de jours ε : Terme d'erreur

m, k, z, Tb et c les paramètres fixes du modèle

ma, ka, za et ca : les paramètres aléatoires sont intégrés dans le modèle s'ils l'améliorent la prédiction et s'ils sont, dans le cas de za significativement différent de 0.

Avec	$ma = \begin{matrix} ma_{15} \\ ma_{\dots} \\ ma_{28} \end{matrix}$	$ka = \begin{matrix} ka_{15} \\ ka_{\dots} \\ ka_{28} \end{matrix}$	$ca = \begin{matrix} ca_{15} \\ ca_{\dots} \\ ca_{28} \end{matrix}$	$za = \begin{matrix} za_{15} \\ za_{\dots} \\ za_{28} \end{matrix}$
------	---	---	---	---

Équation 2. Equation du modèle avec effets fixes et aléatoires.

Les cinq paramètres « fixes » de cette équation propre à chaque variété et chaque chambre sont : la température seuil en °C (Tb), la latence (z), la vitesse maximum de levée (k) au point d'inflexion de la courbe, le taux maximum de levée (m) ainsi qu'un paramètre donnant une dissymétrie à la courbe (début et fin de distribution différemment étalées) par rapport à son point d'inflexion (c). Le temps t est remplacé par le temps thermique calculé au-dessus d'un seuil ($\Sigma(T-Tb)$).

¹⁹ L'ajustement est basé sur le principe de la maximisation de la vraisemblance tenant compte de la variance associée à chacun des effets aléatoires, ce, par calcul matriciel. (E. Sanson, 2007).

²⁰ Cet effet permet d'intégrer des biais éventuels d'expérimentation qui seront ainsi atténués : effectifs déséquilibrés, hétérogénéités entre lots et hygrométries des chambres.

En pratique, on procèdera à l'inverse. L'intégration d'un effet aléatoire dans l'équation sera arbitrée par un test de comparaison de modèles emboîtés basés sur le rapport de vraisemblance. Cette procédure de sélection pas à pas des effets aléatoires consiste à partir du modèle comprenant des effets aléatoires sur tous les paramètres, à enlever à chaque étape l'effet aléatoire le moins important. On compare les deux modèles (avec et sans) à l'aide d'un test du rapport de vraisemblance. Ce dernier concorde en général avec la comparaison des critères AIC et BIC basés sur la log-vraisemblance ; on conserve le modèle qui possède les critères les plus faibles. Au cours de la procédure de sélection, si le paramètre fixe (z), qui exprime la latence, est significativement différent de zéro, il est conservé dans le modèle.

Par comparaison des ajustements, l'équation la plus simple possible et surtout la plus fidèle à nos observations sera ainsi conservée.

Le modèle obtenu permettra d'obtenir pour chaque variété les paramètres suivants :

- La température seuil de fonctionnement (T_b);
- la latence (z);
- la vitesse maximum au point d'inflexion (k);
- le taux maximum de levée ou « plateau » (m).

Les précisions sur les paramètres sont obtenus par la méthode dite *Delta*²¹, la précision des modèles est quant à elle basée sur le principe de la validation croisée de type « leave-one-out »²².

A l'aide de ces paramètres, on pourra obtenir :

- La demie-levée Θ_{50} , c'est-à-dire le temps nécessaire en somme de degré.jour au-dessus de la température seuil pour que la moitié des boutures ayant levées lève²³ ;
- L'étalement de la levée Θ_{25-75} , c'est-à-dire le temps nécessaire en somme de degré.jour au dessus de la température seuil pour que la moitié des boutures levées, centrée autour de la médiane, lève;
- La représentation de la dynamique de levée en pourcentage par jour à une température constante donnée (tout taux de levée correspondant à une durée) et par conséquent toute durée (en jours pour une température constante ou degré.jour au dessus d'une température seuil) correspondant à une étape de développement (taux de levée particulier) ou encore toute durée entre deux étapes de développement comme l'étalement de la levée Θ_{25-75} .

²¹ La méthode Delta est couramment utilisée. Elle consiste à estimer l'intervalle de confiance d'un paramètre à partir d'une estimation de la variance de ce paramètre partant du principe que les estimateurs du maximum de vraisemblance suivent une distribution asymptotique normale.

²² La technique du « leave-one-out » repose sur le principe d'une validation croisée du modèle avec autant de nombre de tests que la taille de l'échantillon ; les paramètres sont estimés sur les données de l'ensemble de l'échantillon moins un.

²³ Ce temps correspond à l'abscisse du point d'inflexion de la courbe dont la pente en ce point caractérise la vitesse maximum du processus.

4.4. Méthode de Validation

Idéalement la nature des boutures utilisées ne devrait pas changer le modèle de développement mais il s'agit de multiplication végétative avec des organes qui gardent une trace de leur vécu agro physiologique (teneurs en sucres, hormones, nombre de cellules des primordia...); il est donc nécessaire de confronter notre modèle avec des lots de boutures aux pieds-mères d'origine et de maturité variées.

Les boutures utilisées jusqu'à présent pour notre étude provenaient toutes de pieds-mères de même origine, c'est-à-dire bouturés en même temps et plantés au même endroit, avec un itinéraire technique identique depuis leur plantation jusqu'à leur récolte. Afin de voir s'il existe des différences de qualité de boutures selon l'origine des pieds-mères nous observons les dynamiques de levée de boutures issues de pieds-mères plantés à des altitudes différentes. Ces pieds-mères ont des conditions différentes de croissance principalement du point de vue thermique mais aussi radiatif et ont été récoltés à des âges chronologiques différents. Nous faisons l'hypothèse que le facteur pouvant agir est l'âge thermique²⁴ qui se traduit sans doute principalement au niveau des bourgeons par des teneurs en sucre et un niveau d'inhibition (« intensité » de dormance) acquis au cours de la croissance de la tige. L'origine des pieds-mère est résumé Tableau 11.

Nous tentons dans la suite de l'étude de caractériser l'influence de **l'âge thermique et de la teneur en sucre** des pieds-mère sur la dynamique de levée des lots de boutures.

Au cours des trois expérimentations à températures constantes (exp.1, exp. 2 et exp. 3) 40 lots de boutures ont fourni leur propre dynamique de levée. Les conditions de température étant naturellement fluctuantes, les dynamiques respectives de 13 lots de boutures en serre (exp. 4) et au champ (exp. 5) en condition de températures fluctuantes sont elles aussi analysées en comparaison avec le modèle. Il s'en suit une discussion sur les limites du modèle, la qualité des lots de boutures et les performances variétales.

5. Résultats & Discussion

5.1. Observations

Les levées sont contrastées selon les températures et entre variétés.

Tandis qu'à 19, 23 et 28 °C, les proportions de levée sont fortes (supérieures à 80 %) et rapides (moins de 20 jours) pour la majorité des bourgeons de la plupart des variétés, les levées sont beaucoup moins nombreuses et beaucoup plus lentes à 15°C (Figure 35). De plus, à 15°C toujours, on n'observe aucune levée pour la variété R 577 et très peu (3 % correspondant à 1 individus sur 32) pour la variété R 579. Globalement, les durées pour atteindre la levée sont plus longues pour ces 2 variétés. Pour certaines variétés comme R 583 et R 579, on observe des levées plus limitées en nombre à 28°C (Figure 36) comme s'il existait une limite dans l'amélioration des performances de levée avec l'augmentation des températures. Laffite *et al.* (1997) décrivent, dans le cas de variétés de maïs adaptées aux terres d'altitude, une meilleure réponse en rendement de grains à 13°C qu'à 28°C. Il précise qu'une variété ne peut être performante sur l'ensemble d'une large gamme de

²⁴ L'âge thermique correspond dans ce cas à la somme des degré.jour accumulés depuis la levée de la plante.

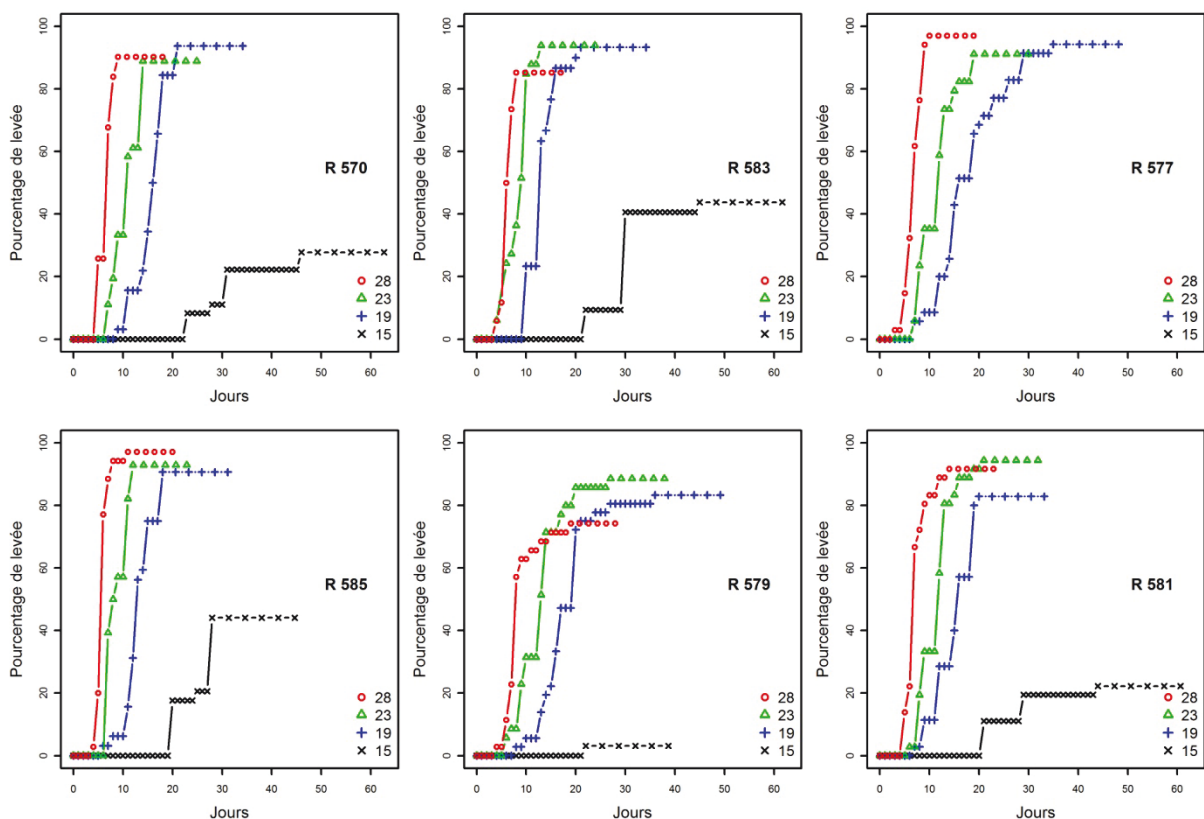


Figure 35. Exp.1. Evolution des taux journaliers de levée (en pourcentage) pour 6 variétés mises en condition de levée dans des chambres climatiques aux températures constantes de 15, 19, 23 et 28°C.

température. Ce qui confirme notre hypothèse selon laquelle l'effet de la température sur les pourcentages de levées n'est pas tout à fait linéaire.

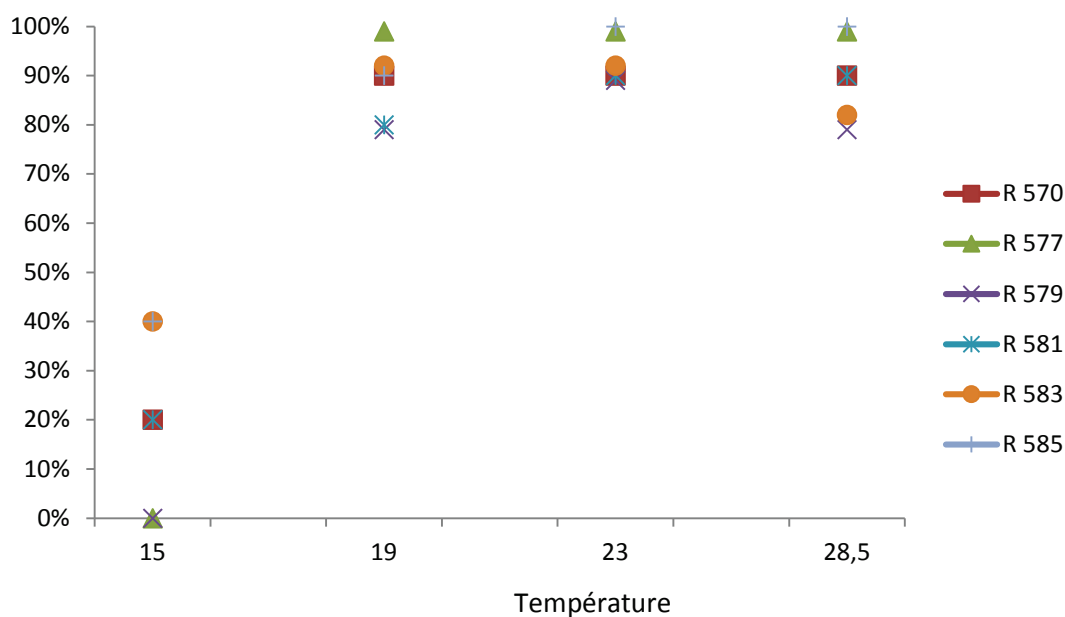


Figure 36. Taux de levée en pourcentage de chaque variété selon la température (en °C)

Les faibles taux de levées atteints à 15°C (Figure 36) reflètent l'apparition, à basse température, de processus non présents auparavant. Ces nombreux échecs de levée rapportés très récemment par Smit (2011), lui aussi dans des conditions de température à 15°C, sur des variétés sud africaines, correspondent à des mortalités de bourgeons qui se mêlent aux processus de débourrement ralentis à basse température.

5.2. Etablissement d'un modèle de débourrement

Nous faisons l'hypothèse que les différences entre chambres climatiques sont principalement imputables à la température elle-même mais aussi, dans une moindre mesure, au lot de boutures (nombre trop réduit) ou à des conditions (hors température) différentes d'une chambre à l'autre (réapprovisionnement en eau). Ces différences entre chambres climatiques sont modélisées par les effets aléatoires introduits dans le modèle.

En conditions contrôlées parfaites, c'est-à-dire en l'absence de différences entre chambres climatiques autres que celles dues à la température, si l'effet de la température était linéaire, comme les températures des chambres climatiques sont espacées régulièrement de 4°C (sauf entre les plus hautes à 23°C et 28°C pour lesquelles il y a 5°C), les courbes de levée devraient également être espacées régulièrement. Mais les courbes à 15°C sont plus éloignées de celles à 19°C que ne le sont les autres (19°C-23°C et 23°C-28°C). La température n'aurait donc pas un effet linéaire sur le processus de débourrement dans cette gamme. Or notre modèle simple inclut un effet linéaire de la température sur les pourcentages de levées. Il convient donc d'ajouter un effet aléatoire (non linéaire) de la chambre climatique dans le modèle.

Compte tenu du faible nombre d'évènements observés à 15°C et par conséquent de points disponibles²⁵, et comme des processus différents agissent sur les courbes de levées à 15°C, il semble peu pertinent d'intégrer les jeux de données obtenus à 15°C pour établir un modèle. Nous décidons, tout comme Smitt (2011), de ne pas utiliser les données de levée recueillies à 15°C.

5.2.1. Modélisation excluant les observations à 15°C

Pour chaque variété, le modèle non-linéaire mixte utilisé fournit le modèle moyen, commun aux différentes températures (sauf 15°C), la dynamique de levée en fonction des sommes de températures accumulées au dessus de la température seuil obtenue. Outre la température seuil, les paramètres du modèle moyen (Tableau 12), les valeurs correspondantes à la demie-levée Θ_{50} et à l'étalement de la levée Θ_{25-75} sont calculées à partir des paramètres estimés par le modèle. Pour chacune des variétés, les pourcentages de levées observés en fonction de la somme des températures accumulées au-dessus de sa température seuil sont représentés sur les graphiques de la Figure 37.

²⁵ Dans le cas de la variété R577 qui n'a pas levée à 15°C, les comparaisons des paramètres des modèles obtenus par variété seraient impossibles.

Tableau 12. Températures seuils, paramètres des modèles moyens et durée (en somme de degré.jour au dessus du seuil) de la demie levée et de l'étalement de la levée (50% de la population levée) pour 8 variétés à 3 températures. La température seuil en °C (Tb), la latence (z), la vitesse maximum de levée (k) au point d'inflexion de la courbe, le taux maximum de levée (m) ainsi qu'un paramètre donnant une dissymétrie à la courbe (début et fin de distribution différemment étalées) par rapport à son point d'inflexion (c). Le temps (t) est remplacé par le temps thermique calculé au-dessus d'un seuil ($\Sigma(T-T_b)$).

Paramètres du modèle						Sorties		
variété	Tb (se)	m (se)	k (10 ⁻³) (se)	c (se)	z (se)	Θ_{50} (se)**	Θ_{25-75} (se)	Rmse (se)
R570	13,03 (0,35) c	0.91 (0.01)	9,56 (0,54)	5,55 (0,72)	0	97,9 (4,5) b	27,4 (4,4) ab	5,3 (1,4)
R583	10,89 (0,32) ab	0,91 (0.01)	9,23 (0,30)	5,83 (0,40)	0	101,7 (3,2) b	27,1 (1,9) a	5,5 (1,4)
R577	11,23 (0,36) b	0.95 (0.01)	12,33 (0,95)	2,11 (0,56)	55,1 (8,9)	123,2 (6,4) c	49,7 (10,1) c	4,0 (0,9)
R585	12,40 (0,27) c	0.94 (0.02)	34,99 (4,10)	1,33 (0,20)	62,6 (3,6)	84,3 (2,6) a	25,3 (1,9) a	7,1 (1,8)
R579	10,66 (0,27) a	0.80 (0.04)	6,72 (0,39)	5,48 (1,02)	0	139,2 (6,4) d	39,4 (8,7) bc	4,0 (0,8)
R581	12,99 (0,38) c	0.89 (0.02)	9,31 (0,63)	4,46 (0,23)	0	99,0 (6,6) b	34,4 (2,9) b	5,3 (1,2)
NCo376*	12,46 (0,20)	0,83 (0,01)	20,94 (3,15)	1,53 (0,35)	106,6 (3,0)	144,1 (4,6)	38,0 (12,0)	5,5 (1,0)
R582*	13,39 (0,26)	0,95 (0,02)	36,19 (5,67)	1,42 (0,30)	53,52 (3,8)	74,9 (2,8)	23,3 (1,9)	8,6 (2,1)

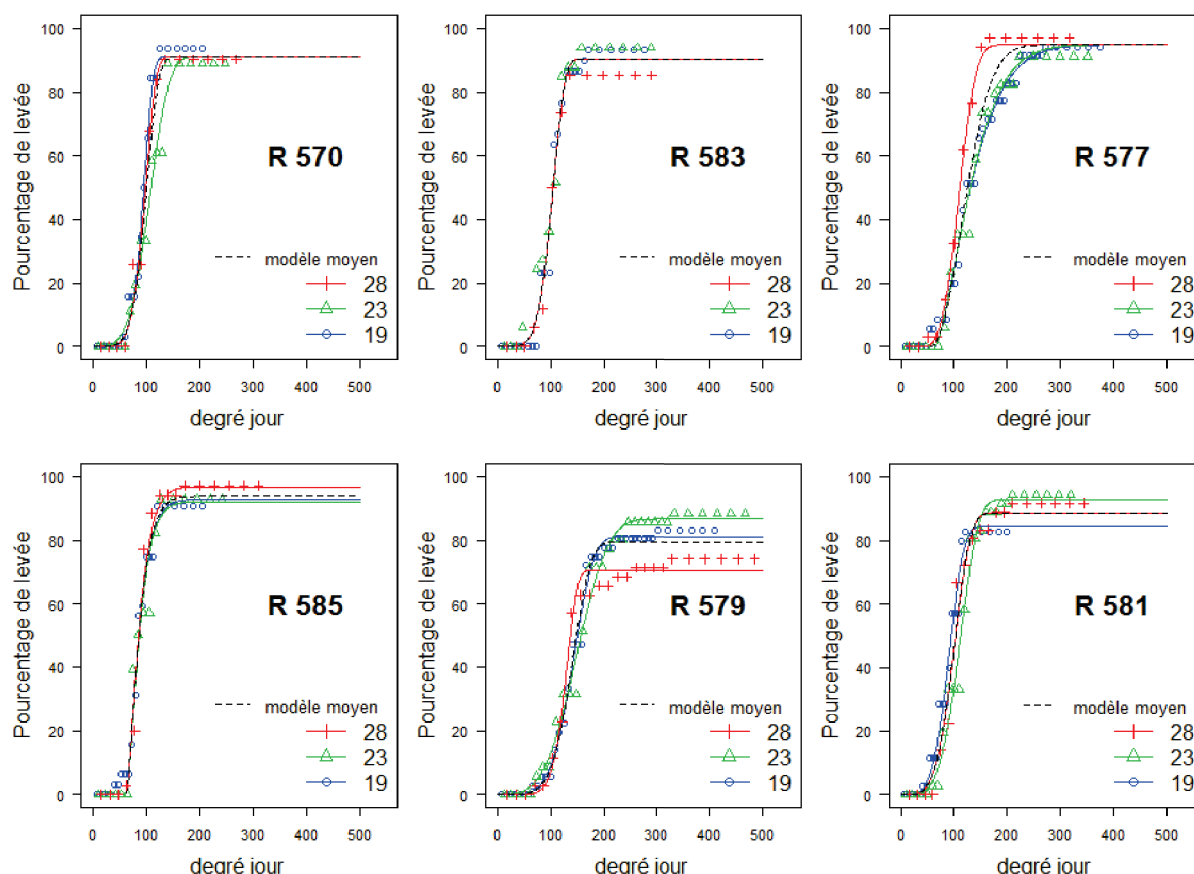
Pour chaque paramètre, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

*Les variétés NCo376 et R582 ne sont pas intégrées à la comparaison car elles sont issues de tiges mères d'une autre provenance que les six premières (Tableau 11). Les précisions des paramètres sont obtenus par la méthode dite delta, la précision des modèles est quant à elle basée sur le principe du «leave-one-out».

**le Θ_{50} est celui obtenu sur les boutures levées et non sur celles plantées

Seules les variétés R577 et R585 ont des latences significativement différentes de 0.

Pour les trois variétés R 570, R 583 et R577 (sauf à 28°C) et dans une moindre mesure pour la variété R585, les modèles établis, propres à chaque température incluant des effets aléatoires sont proches, voire confondus (pour R583) au modèle moyen (pointillés sur la Figure 37). Cela signifie que les variations entre chambres climatiques sont faibles.



Etabli à partir des données des trois chambres climatiques à 19°C, 23°C et 28°C, les courbes représentent les modèles à effets mixtes pour chaque température des pourcentages de levées en fonction des degré.jour accumulés au dessus de la température seuil (Tb), les croix, triangles, et ronds les points observés, en pointillés les modèles moyens à effets fixes.

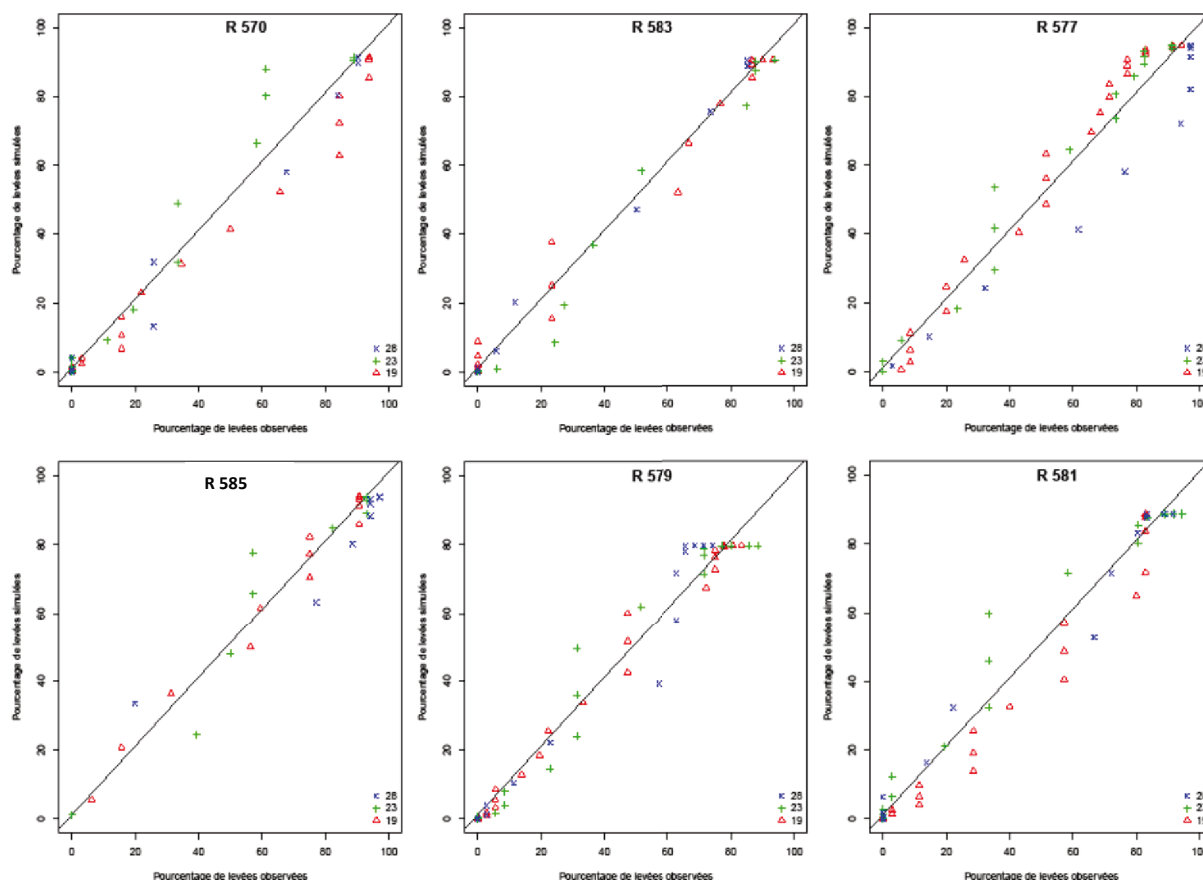
Figure 37. Exp. 1 : Représentation du modèle de débourrement

L'utilisation des sommes de degré.jour au dessus d'un seuil estimé au mieux par le modèle confirme l'influence considérable de la température sur le processus. Alors que les dynamiques de débourrement étaient distinctes dans le temps (exprimé en jour, Figure 35), la projection de ce même processus dans un repère en degré.jour avec une température seuil ajustée rend les dynamiques très similaires par variété d'une chambre climatique à une autre (Figure 37). Nous retrouvons le principe décrit dans la littérature, illustré (chapitre 4.3 page 44) par l'installation du feuillage de la variété R570 (Martiné et al., 1999) cette fois sur le processus de débourrement et ce pour chacune des variétés étudiées.

Pour ce qui est de la précision de la prédiction, la Figure 38 représente chacune des valeurs prédites en fonction des valeurs réellement observées des taux de levée en degré.jour. Cette figure nous permet d'évaluer visuellement sur un graphique l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prédites par la distance de chaque point, représentant un couple (valeur observée / valeur prédite), à la bissectrice. Nous observons des écarts relativement faibles entre valeurs observées et prédites, ce qui témoigne d'une prédiction relativement précise et homogène le long de la droite, sans déviation prononcée en début ou fin de processus (sans phénomène d'hétéroscédasticité – Cf note de bas de page n°15 page 60) sauf pour R579 à fort taux de levée et pour R577 à 28°C (points bleus) en petite proportion sans que cela ne remette en question la validité du modèle pour ces variétés. La précision

de prédiction (RMSEP) qui correspond à l'erreur commise sur la levée prédite en pourcentage est acceptable, elle se situe entre 4 et 7,1% selon les variétés (Tableau 12).

Le modèle moyen de chaque variété représente donc assez fidèlement le processus de débourrement à l'aide d'une équation commune à toutes les températures.



Comparaison entre valeurs simulées et observées des modèles moyens non-linéaire à effets fixes par variété (3 températures).

Figure 38. Exp. 1 : Précision du modèle de débourrement

5.2.2. Comparaisons variétales

Les paramètres obtenus par modélisation du processus de débourrement sont utiles pour comparer les variétés entre elles, ils éclairent sur les comportements respectifs des variétés. R 583 et R579 possèdent une température seuil inférieure de 2°C à celles de R570 et R581 (Tableau 12) et de 1,6°C comparée à R585. Elles vont donc accumuler 2°C ou 1,6°C de plus par jour. La température seuil de fonctionnement pèse ainsi considérablement sur la dynamique de levée, d'autant plus qu'on se situe à des températures proches de celle-ci et que les processus sont lents (Bonhomme, 2000). Par ailleurs, R585 subit une latence qui lui demande d'accumuler 63°C avant de démarrer le processus de débourrement mais possède une vitesse maximum qui est entre 4 et 5 fois plus rapide que R 583 ou R579 (Tableau 12).

Dans cette mesure les paramètres ne peuvent pas être considérés indépendamment, ils composent une équation qui seule caractérise le processus. Il en est de même avec les valeurs de Θ_{50} et Θ_{25-75} qui sont précieuses à condition de les associer à une température seuil. Cette dernière devra être prise

en compte quotidiennement dans le calcul de la somme des degré.jour pour comparer les performances des variétés ou les classer au regard d'un stade de développement à atteindre.

Il est possible de juxtaposer les dynamiques de levée respectives des variétés à une température donnée à l'aide de prédictions calculées par le modèle (Figure 39 A).

Indépendamment des conditions de température ou d'humidité, certaines variétés ont une capacité à lever plus forte que d'autres. Notre protocole a permis de limiter les facteurs qui pouvaient interférer comme l'état sanitaire des boutures, les boutures issues des hauts de tiges, trop jeunes ou des bas de tige, trop vieilles. L'effet de la dominance apicale qui pourrait être plus ou moins marqué selon les variétés a été écarté, quant à lui, en utilisant des boutures d'un seul bourgeon. Les pots contenant les boutures ont été réalimentés en eau. Bien qu'une bonne capacité de levée soit évidemment un atout pour l'installation d'une variété, notre étude vise à mettre en évidence la capacité intrinsèque d'une variété à mieux se comporter en condition plus fraîche. Ainsi nous allons considérer la capacité de lever au potentiel, c'est-à-dire que l'on considère seulement les bourgeons qui ont levés. S'affranchir de la fluctuation des taux de levée maximum selon les températures et entre variétés revient à ne considérer la dynamique de levée qu'à l'intérieur de la population de boutures levées (Figure 39 B).

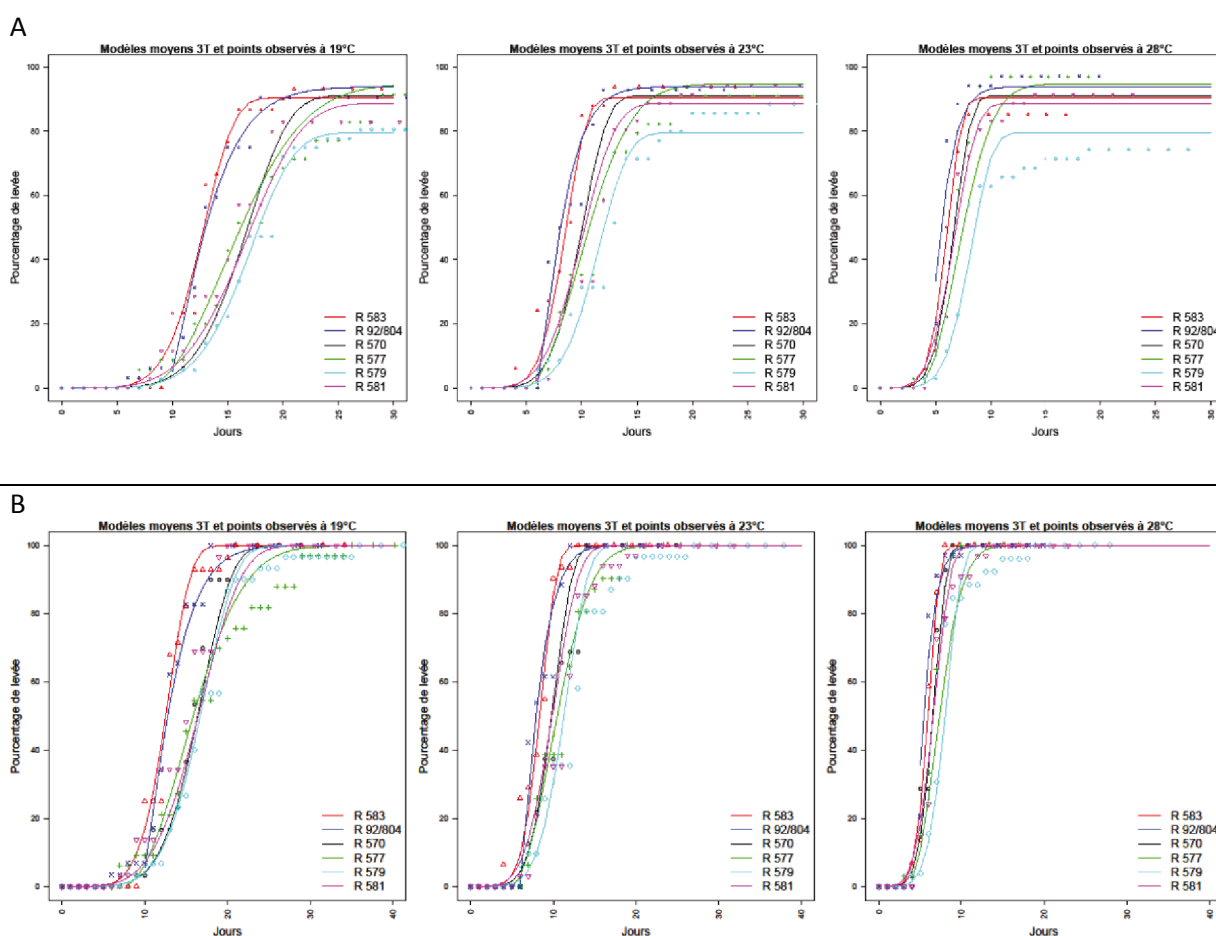
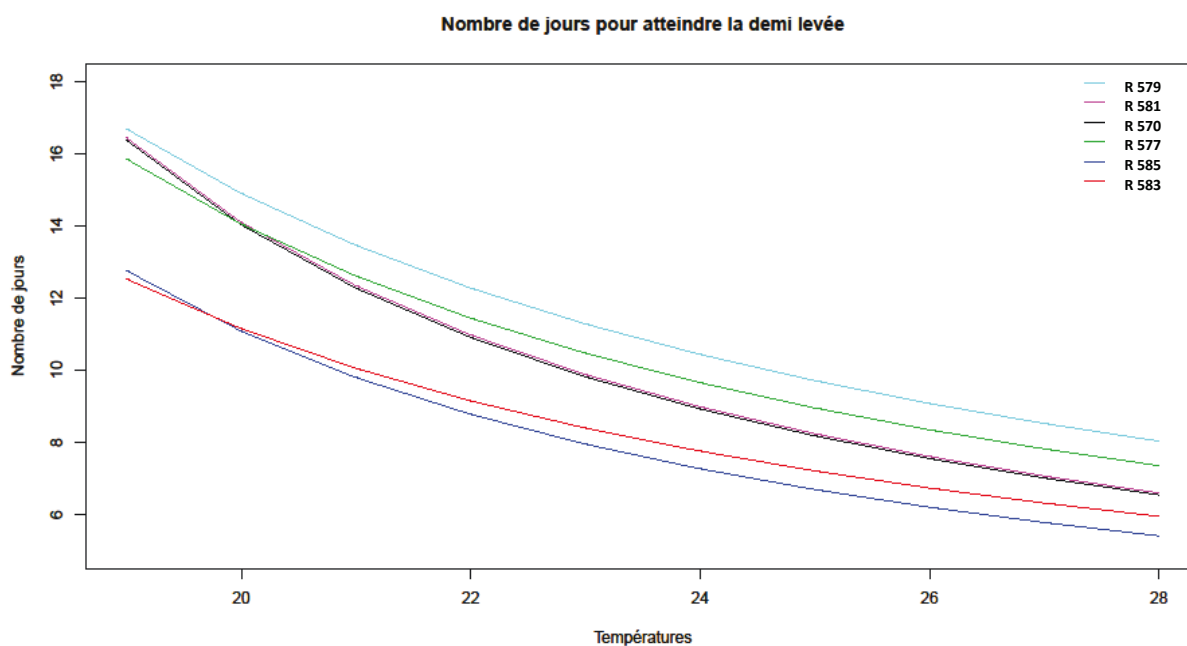


Figure 39. Représentation des dynamiques prédites par le modèle de débourrement de 6 variétés à 3 températures constantes et points observés (A) taux de levées absolus (B) taux de levées relatifs (ramenés à 100). Remarque le clone R92/804 devient R585 en 2010.

On constate que quelque soit la représentation utilisant le taux de levée maximum moyen « absolu » (Figure 39 A) ou bien celui ramené à 100 « relatif » (Figure 39 B), les courbes sont proches pour les plus hautes températures : les dynamiques ne se distinguent que très peu d'une variété à une autre. A 19°C, température plus fraîche, les variétés R583 et R585 se distinguent des autres variétés dans les deux cas. Elles se distinguent d'autant mieux que les températures se rafraîchissent, comme le montre l'évolution de la durée prédite nécessaire à la demi-levée par variété en fonction de températures constantes (Figure 40).

Les variétés R583 et R585 ont des levées relativement plus rapides que les autres variétés d'autant plus qu'elles sont placées en condition de basses températures. D'après les tendances respectives par variété du nombre de jours nécessaires pour atteindre la demi-levée, les performances des variétés R583 et R585 (ex R92/804) seraient encore meilleurs comparativement aux autres variétés à mesure que les conditions se rafraîchiraient au dessous de 19°C, mais des réserves doivent être émises car nous nous situons en dehors de la gamme de températures qui a permis de construire le modèle.



Nombre de jours nécessaires prédits à partir du modèle T3 pour atteindre la demi-levée (sur boutures levées) pour 6 variétés en fonction de la température constante.

Figure 40. Prédiction du modèle T3 pour la demi-levée

5.3. Validation du modèle

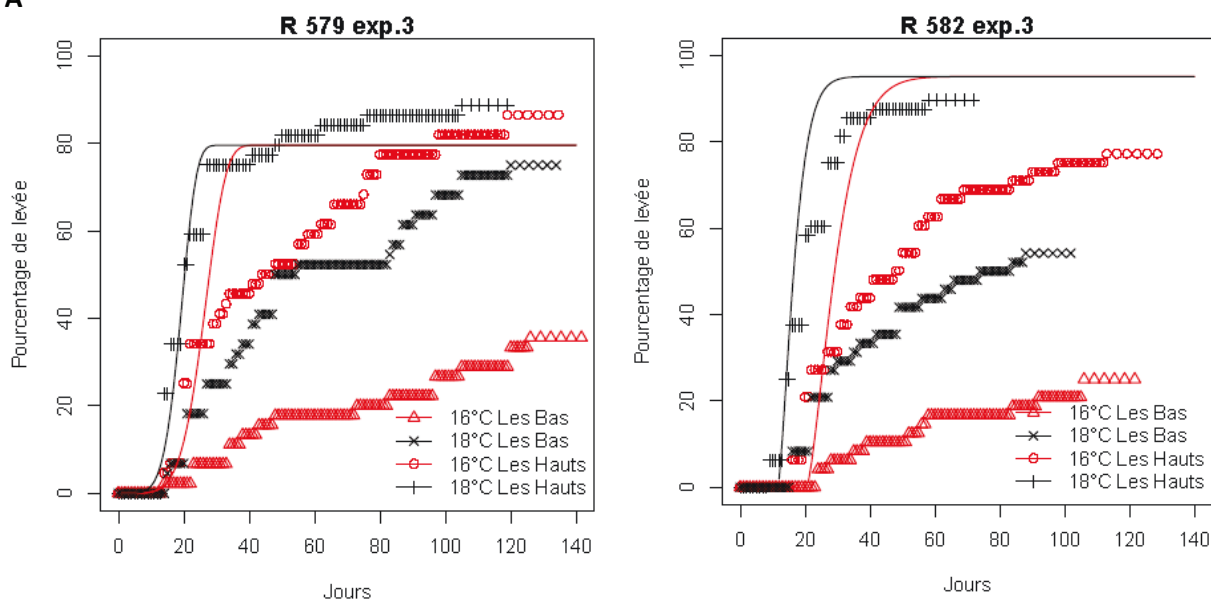
5.3.1. Validation du modèle en fonction de la nature des boutures

a) Effet de la provenance des pieds-mère

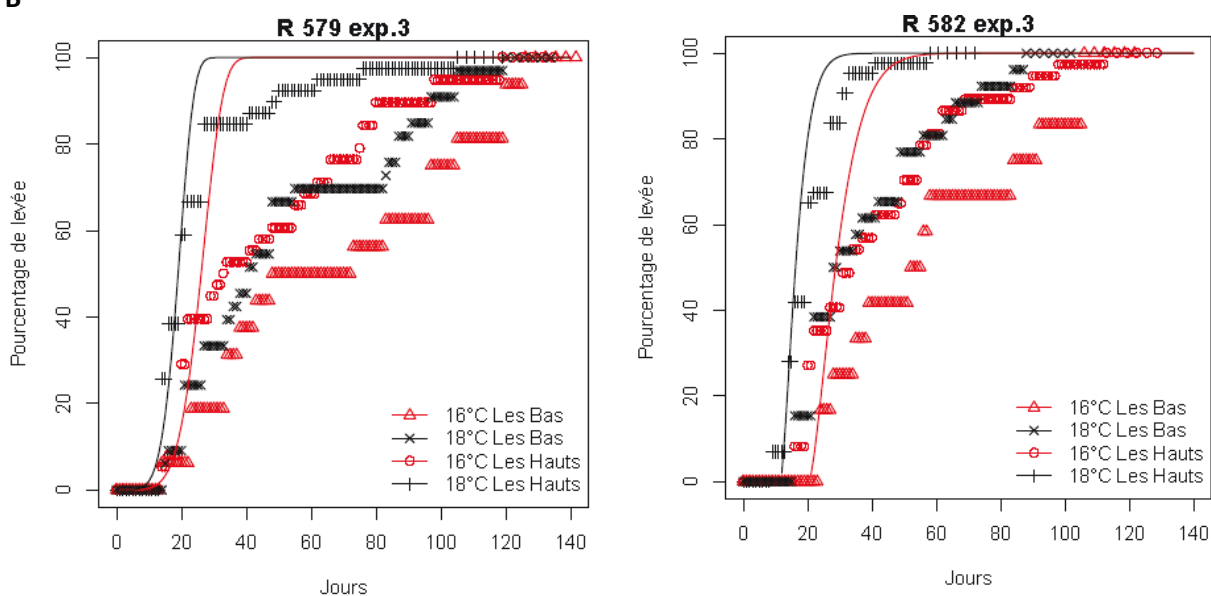
L'essai a été simultanément conduit avec deux lots de boutures, issus de pieds-mères d'origines différentes dans 2 chambres climatiques à températures constantes de 16°C et 18°C (exp.3). Pour chacune des deux variétés (R579 et R582) provenant de pieds-mères d'âges chronologiques proches avec 418 jours pour la culture dans les Bas et 441 jours dans les Hauts mais aux origines altitudinales différentes (50 m et 850 m) (Tableau 11).

Pour la variété R582, les paramètres du modèle de débourrement ont été calculés dans le même dispositif que pour les 6 variétés présentées précédemment. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 12.

A



B



En jour, pour les boutures de 2 variétés, aux pieds- mères provenant de deux sites mises en condition de levée dans des chambres climatiques aux températures constantes de 16 et 18 °C A : sur l'ensemble des boutures plantées ; B sur les boutures levée .

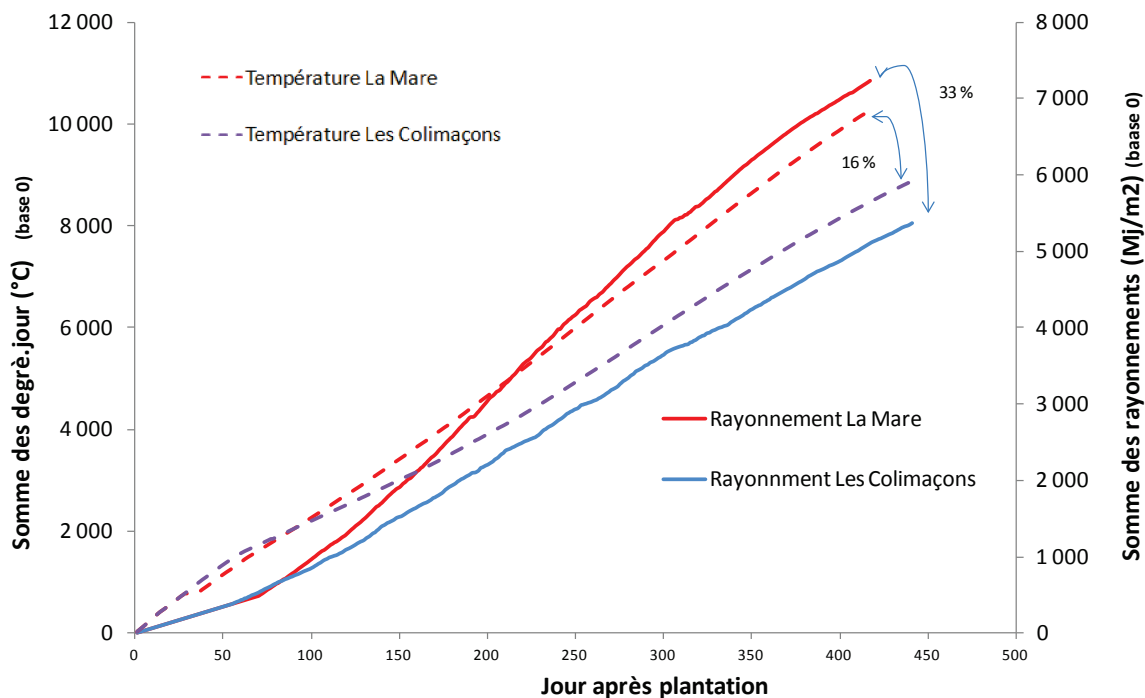
Figure 41. Exp. 3 : Evolution des taux de levée

Les dynamiques de levée des lots de boutures de deux variétés en fonction de l'origine de leurs pieds-mères et de leur température de culture sont présentés en pourcentages de levée des boutures plantées (Figure 41A) et en pourcentages de levée des boutures ayant levée (« relatif ») (Figure 41B). Selon l'origine des pieds-mères on constate que les dynamiques de levées sont très différentes. Le recours à des pieds-mères d'origines différentes, entraîne des lots de boutures de qualités différentes aux dynamiques de levée différentes.

Les boutures issues de pieds-mères cultivés dans les Hauts ont systématiquement levée en plus grand nombre pour les deux variétés étudiées aux deux températures (Figure 41 A), elles lèvent plus tôt et plus vite que celles issues de pieds-mères provenant des Bas.

Un bon état sanitaire des boutures préparées en altitude pourrait justifier une meilleure levée comparativement à celle préparées dans les Bas comme observé par Van Dillewijn (1952). Dans notre cas, le lot préparé dans les Bas et planté à 18°C a levé convenablement avec un taux supérieur à 80% (Figure 41 A). L'état sanitaire n'est donc pas la raison de la différence de levée. Arceneaux (1935) écrit qu'une nutrition azotée satisfaisante des plants-mères est la garantie pour une levée abondante et rapide des bourgeons. Bien qu'en principe ayant subi les mêmes apports nutritifs et hydriques (deux sites en conditions irriguées), une assimilation particulière, propre aux climats, pourraient être à l'origine des différences.

Les profils thermiques et radiatifs qui ont prévalu durant la croissance des pieds-mères sont présentés Figure 42 .



En somme de degré.jour (base 0) et en somme des radiations (MJ/m²) lors de la préparation des boutures sur les sites de La Mare (70 m) et des Colimaçons (790 m)

Source : propriété Cirad - Météo France

Figure 42. Exp. 3 : Profils thermiques

La somme des degré.jour (base 0) accumulée par le premier site de La Mare est de 10 300 °C contre 8 900 °C pour le second des Colimaçons. Les rayonnements cumulés depuis la levée en serre jusqu'à la récolte au champ sont respectivement de 7 200 MJ/m² pour Les Bas et de 5 400 MJ/m² pour les Hauts (Tableau 11 page 91).

En résumé, les pieds-mères cultivés dans les Hauts sont plus âgés chronologiquement (de 23 jours) mais plus jeune thermiquement (moins 16 % de somme de degré.jour, base 0). Le rayonnement accumulé durant leur culture est considérablement réduit (moins 33 %). À ce stade, on constate qu'il peut exister des différences de comportement en levée et que celles-ci sont imputables à des qualités variables d'un lot de boutures à un autre.

Il est possible de réduire la variabilité des levées au sein d'un lot de boutures en homogénéisant la qualité, mais il reste indispensable de recourir à des boutures provenant d'un même site pour effectuer des comparaisons entre variétés ou traitements à partir de lots comparables.

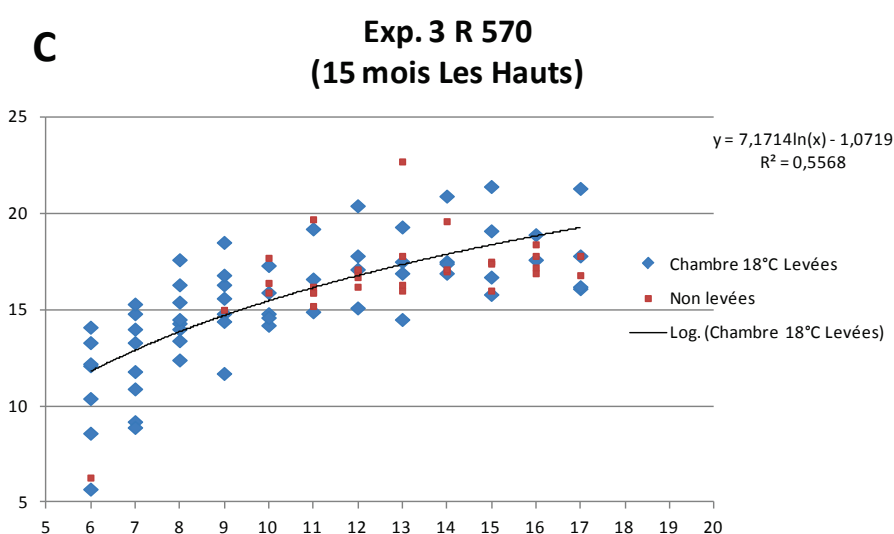
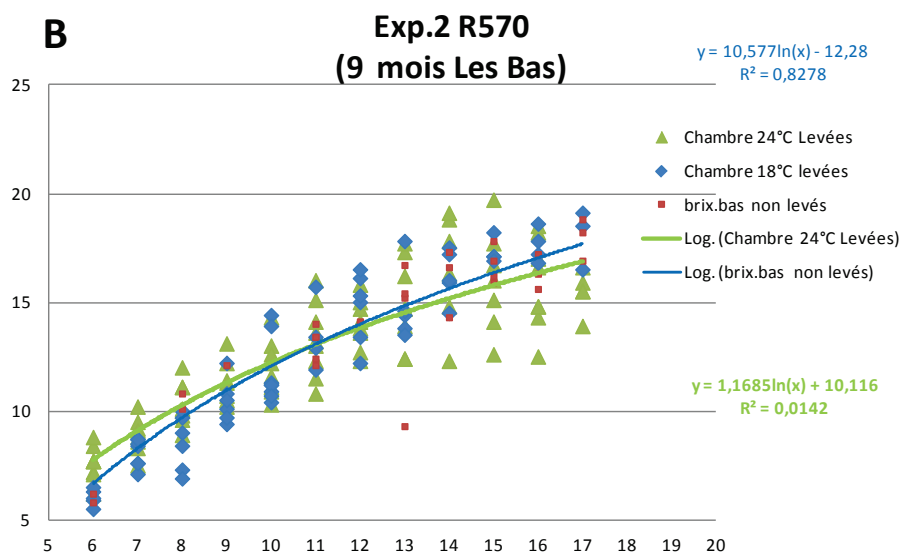
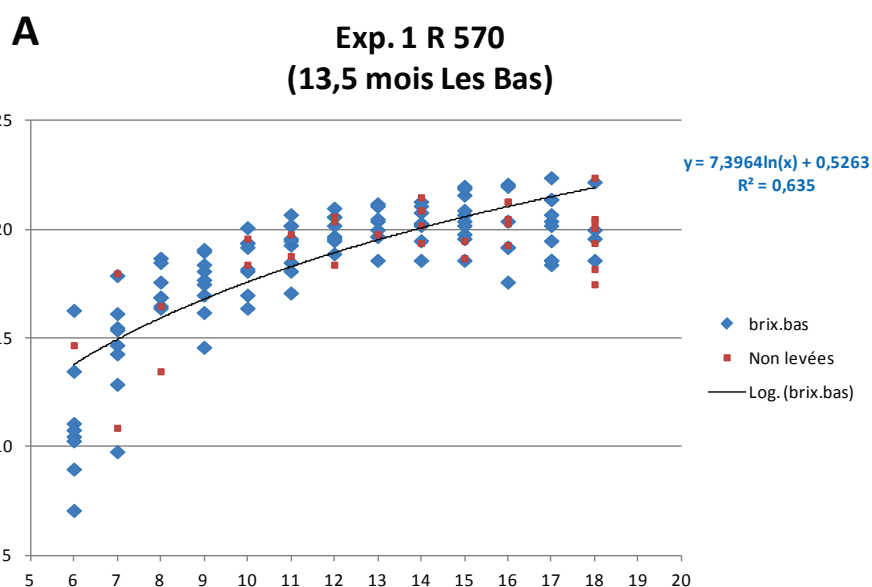
b) Effet de la maturité des tiges-mères

À l'aide des dynamiques de levées obtenues dans les exp. 2 et exp. 3 comparées au modèle, nous tenterons d'établir des relations entre les profils de teneur en sucre des lots de boutures et leur comportement respectifs en levée.

Les profils de teneur en sucre des lots de boutures ayant servi à la modélisation de la levée (exp. 1) sont présentés en tête des 4 jeux de graphiques suivants (Figure 43, Figure 44, Figure 45, Figure 46). Ces profils sont exprimés par la valeur Brix de chacune des boutures du lot en fonction de sa position d'origine le long de la tige-mère ; on numérote toujours en partant du haut de tige. Les boutures n'ayant pas levée sont de couleur rouge. On compare ensuite ces profils à ceux des autres lots des exp. 2 ou exp. 3.

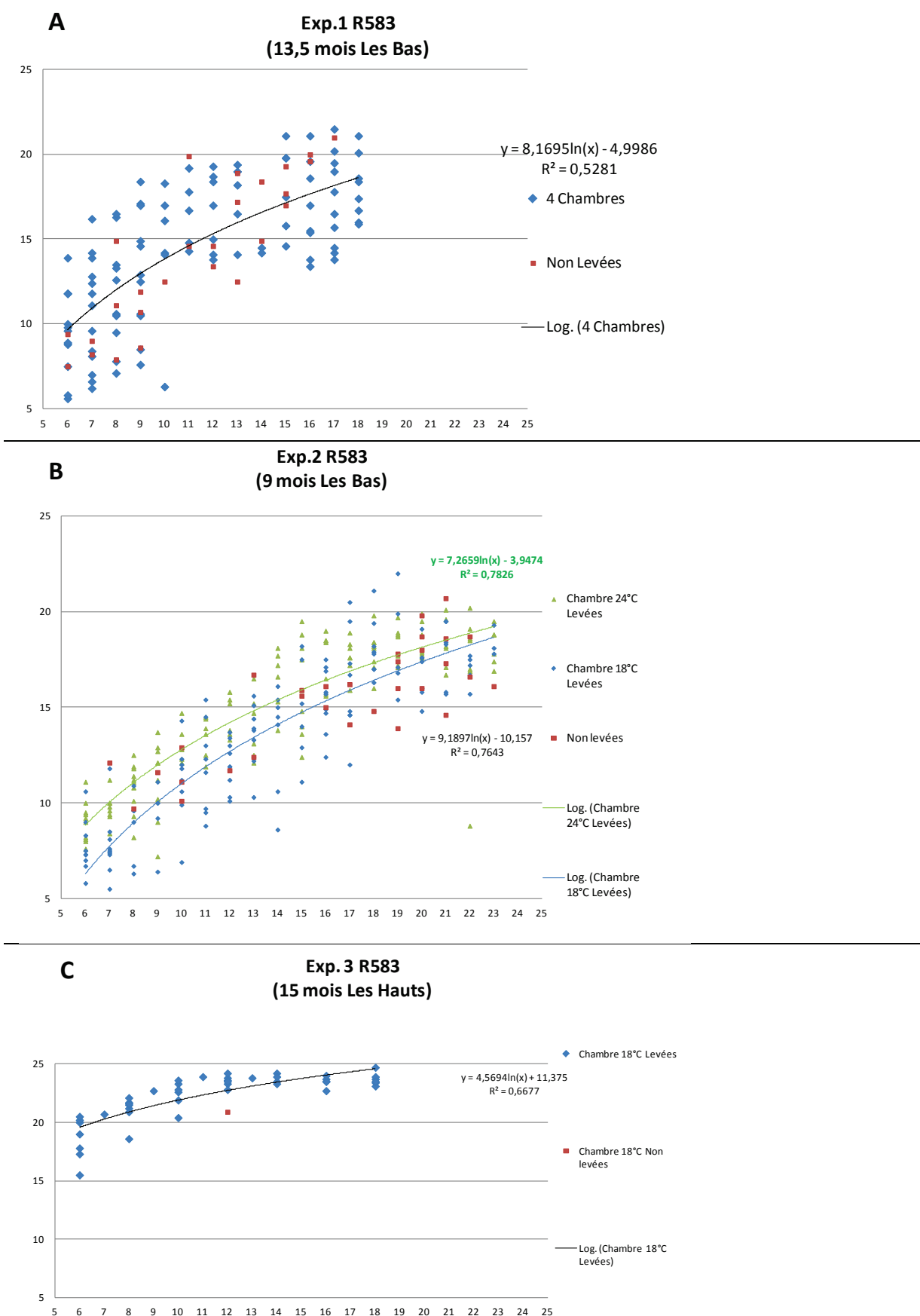
Pour l'exp. 1 qui traite des données utilisées pour l'élaboration du modèle, les valeurs de teneur en sucre pour R570 des boutures issues des boutures du haut (bourgeons n°6, 7, 8 et 9) ont des valeurs dispersées entre 7 et 16 alors que celles issues du bas de tige (bourgeons à partir de n°14) sont regroupées autour d'une valeur de 20 de Brix (Figure 43A). Pour R583 (Figure 44A), on observe un bas de tige en moyenne moins sucré (seulement 5 bourgeons sur 129 soit moins de 4 % atteignent la valeur 20 de Brix) et un étalement constant des valeurs des bourgeons tout le long de la tige. Le profil de teneur en sucre en fonction des positions de bourgeons pour R579 est similaire à celui de R570 (Figure 45A). Pour R582 (Figure 46A), dont les pieds-mères de même altitude mais plantés à une autre date et plus jeunes (10 mois contre 13,5 mois pour les trois autres variétés), les teneurs en sucre des boutures du bas de tige oscillent, comme pour les deux premières (R570 et R579), autour d'une valeur de Brix de 20 mais avec une proportion plus grande de levée tout comme le bas de tige de la variété R583 moins sucré.

L'âge chronologique des pieds-mères et la teneur en sucre de la bouture semblent avoir une influence sur la capacité à lever.

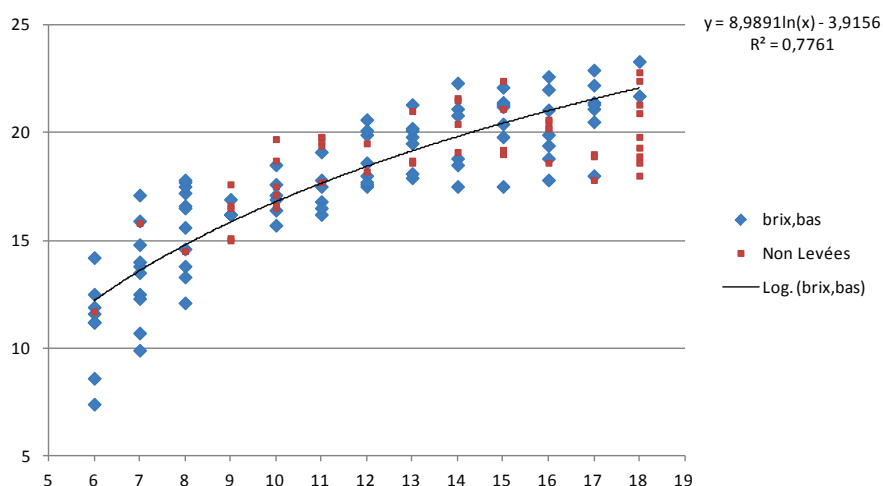
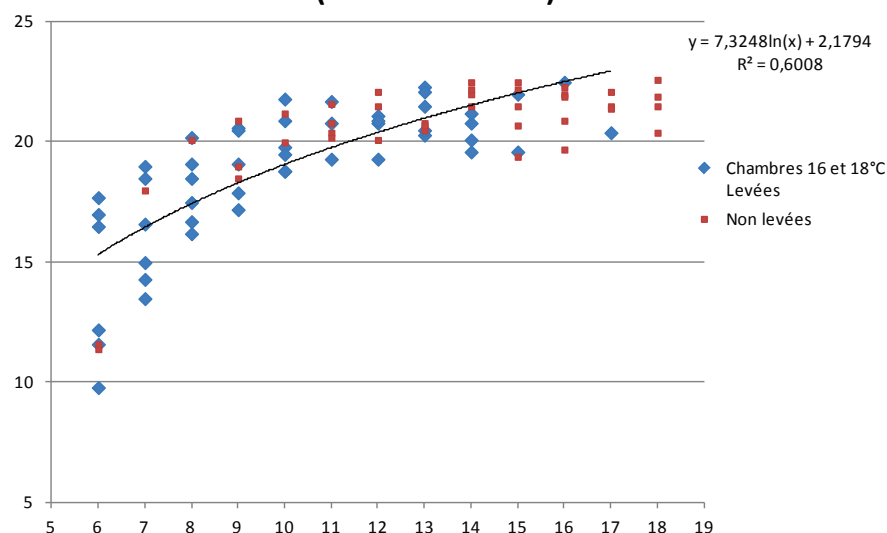
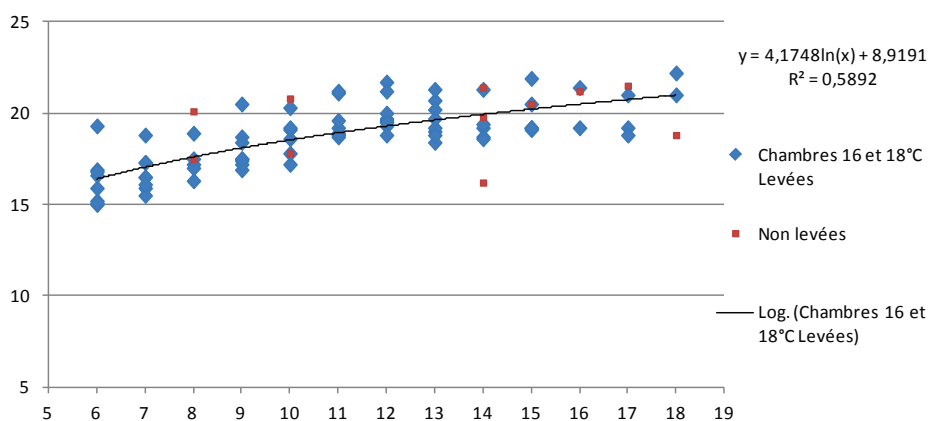


En Brix des lots de boutures selon leur position le long de leur tige-mère d'origine. Âge en mois et provenance Les Hauts ou Les Bas, levés ou non de la variété R570 avant mise en chambres climatiques pour 3 essais à température constante : A : exp. 1 à 15, 21, 23 et 28°C; B : exp. 2 à 18 et 24°C; C : exp. 3 à 18°C.

Figure 43. A : Exp. 1 ; B : Exp. 2 et C : Exp. 3 - Teneur en sucres de la variété R570

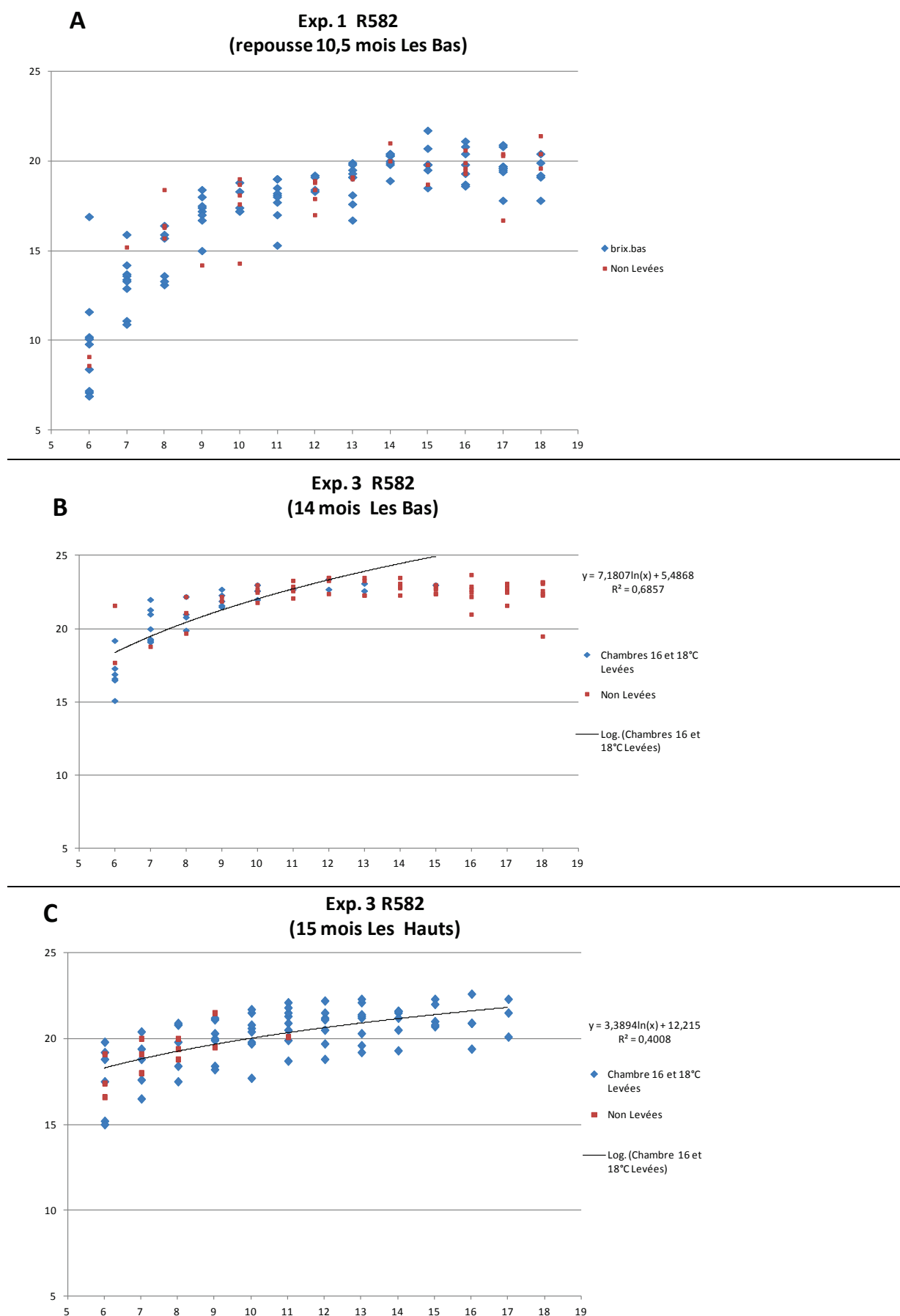


En Brix des lots de boutures selon leur position le long de leur tige-mère d'origine. Âge en mois et provenance Les Hauts ou Les Bas, levés ou non de la variété R583 avant mise en chambres climatiques pour 3 essais à température constante : A : exp. 1 à 15, 21, 23 et 28°C; B : exp. 2 à 18 et 24°C; C : exp. 3 à 18°C.
Figure 44. A : Exp. 1, B : Exp. 2 et C : Exp. 3 - Teneur en sucres de la variété R583

A
**Exp. 1 R579
(13,5 mois Les Bas)**

B
**Exp. 3 R579
(14 mois Les Bas)**

C
**Exp. 3 R579
(15 mois Les Hauts)**


En Brix des lots de bourgeons provenant des Hauts ou des Bas, levés ou non de la variété R579 avant mise en chambres climatiques pour 3 essais. A : 15, 21, 23 et 28°C; B : 16 et 18°C Les Bas; C : 16 et 18°C Les Hauts.

Figure 45. A : Exp. 1 Haut ; exp. 3 Bas et exp. 3 Haut - Profils de teneur en sucres de la variété R579



En Brix des lots de bourgeons provenant des Hauts ou des Bas, levés ou non de la variété R582 avant mise en chambres climatiques pour 3 essais. A : 15, 21, 23 et 28°C; B : 16 et 18°C Les Bas; C : 16 et 18°C Les Hauts

Figure 46. Exp. 1 Bas 10,5 mois; exp. 3 Bas 14 mois et exp. 3 - Profils de teneur en sucres de la variété R582

Pour l'exp. 2, dont les données servent à la validation du modèle, quelques boutures de la série à 18°C de R570 ont levé plus rapidement (Figure 47B points noirs) mais l'ensemble de la série lève en moyenne plus lentement que le modèle. Pour cette série, les teneurs en sucre des boutures (Figure 43B points bleus) sont systématiquement inférieures à celles des bourgeons de la même variété qui ont servis au calibrage du modèle (Figure 43A), en particulier les bourgeons issus des positions inférieures qui ont tous des teneurs en sucre inférieures à 10 de Brix.

La levée en moyenne plus lente pour de ce lot pourrait s'expliquer par la « jeunesse » des boutures de l'exp 2 dont les pieds-mères n'ont que 9 mois contre 13,5 mois pour ceux utilisés pour bâtir le modèle. Mais le lot de boutures planté en chambre à 24°C de même origine de pieds-mères (même variété, même date de plantation, et même âge) aux teneurs en sucre semblables (Figure 43 B) a une levée qui est conforme au modèle (Figure 47B).

L'âge chronologique n'explique pas de façon satisfaisante les écarts entre levées observés et prédites.

Dans l'exp. 3, dont les données servent aussi à la validation du modèle et pour laquelle les pieds-mères de 14 mois et 15 mois proviennent de terrains respectivement des Bas et des Hauts, les levées ont été meilleures pour les boutures issues de pieds-mères d'altitude.

Nous avons vu précédemment (Figure 41, page 103) que les lots de boutures provenant des Bas avaient, dans les conditions de notre expérimentation, à la fois un taux de levée plus faible et des dynamiques de levée plus lentes, mal prédites par le modèle.

Ces lots ont des profils de teneur en sucre (Figure 45B et Figure 46B) qui correspondent à des pieds-mère mûrs²⁶, les teneurs en sucre sont élevées (Brix >20) et assez homogènes le long de la tige et entre tiges (surtout pour R582). Les boutures qui ne lèvent pas proviennent du bas des tiges-mères qui semble impropre au bouturage (Figure 45B et Figure 46B).

La maturité du lot de pieds-mères issus des Bas de 14 mois d'âge chronologique semble avoir une influence néfaste sur la levée.

L'exp. 3 montre que les lots de pieds-mères plus vieux ne sont pas les plus matures. Les 14 mois de préparation dans les Bas correspondent à une accumulation supérieure de température et de rayonnement (Figure 42), ce qui montre qu'il faut considérer l'âge physiologique²⁷ des pieds-mères.

A partir des observations des séries, nous avons tenté de décrire de relations entre teneur en sucre, position originale sur le pied-mère et taux et/ou dynamique de levée.

a) Haut de tige

Pour R583, les deux séries à 18 et 24°C de l'exp. 2 ont comparativement au modèle, des teneurs en sucre des hauts de tige plus faibles (Figure 44B) pour des teneurs en sucre de bas de tiges identiques, leur comportements en levée est comparables au modèle (Figure 47B). Les deux séries R583 et R579 de l'exp. 3 plantées aux Colimaçons (Hauts) ont des boutures de haut de tige plus sucrées que celles

²⁶ CF. 4.2.2 Signification de la teneur en sucre page 78

²⁷ L'âge physiologique d'une tige caractérise son état physiologique à un moment donné. Il dépend à la fois de son âge chronologique et d'autre part, des conditions agro climatiques subies pendant sa croissance.

de l'exp. 1 (Figure 44C et Figure 45C). La première a une levée très en retard par rapport au modèle (Figure 47C) alors que la seconde a une dynamique de levée équivalente avec un taux final légèrement supérieur comparativement au modèle (Figure 41B). La levée des boutures issues de haut de tige est donc indépendante de la teneur en sucre des pieds-mères. **Une faible teneur en sucre du haut de tige ne semble pas être en lien avec la dynamique de levée.**

b) Bas de tige

Pour R570 dans l'exp.3 aux boutures de 15 mois provenant des Hauts (Figure 43 C), de nombreuses boutures issues du bas de tige, plus sucrées que celles du haut de tige ne lèvent pas. Pour R583 de la même provenance, dont les boutures issues de bas de tiges sont plus sucrées que celle de la précédente variété (Figure 44C), la dynamique de levée est très ralentie mais il y a peu de boutures non levées. Pour les séries de boutures issues de pieds-mères mûrs, physiologiquement plus âgés (14 mois dans les Bas), les deux séries de R579 plantées à 16°C et 18°C (Figure 45B) tout comme celles de R582 (Figure 46B), toutes de boutures de bas de tige plus sucrées²⁸ que les boutures provenant des Hauts (Figure 45C et Figure 46C) ont des taux de levée réduits et une dynamique de levée fortement ralentie.

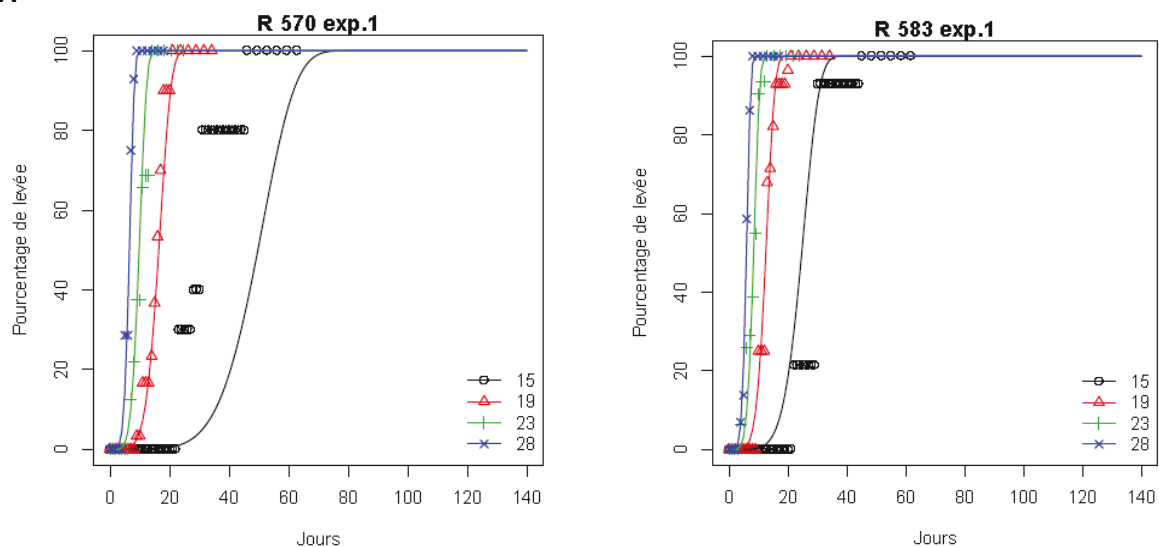
En résumé, des lots de boutures ayant des hauts de tiges aux teneurs en sucres comparables peuvent avoir des dynamiques de levée différentes alors que deux séries de boutures aux teneurs en sucre différentes peuvent correspondre à des levées comparables. **La teneur en sucre des boutures issues du haut de tige n'a donc pas d'influence directe et exclusive sur la levée.**

Les boutures issues de bas de pieds-mères mûrs, c'est-à-dire d'âge physiologique avancé et dont la teneur en sucres est haute et homogène le long de la tige²⁹, ont une levée très compromise. Il n'existe cependant pas de lien de cause à effet entre la maturité et la capacité réduite à lever.

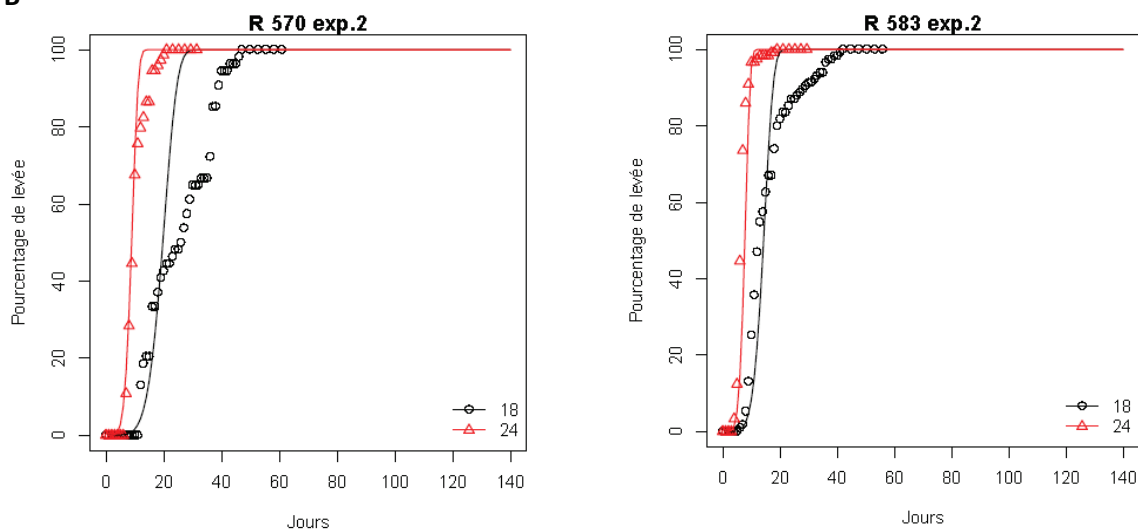
²⁸ La teneur en sucre est élevée (brix > 20)

²⁹ Cf notion de remplissage des entrenœuds au paragraphe 4.2.2 page 98.

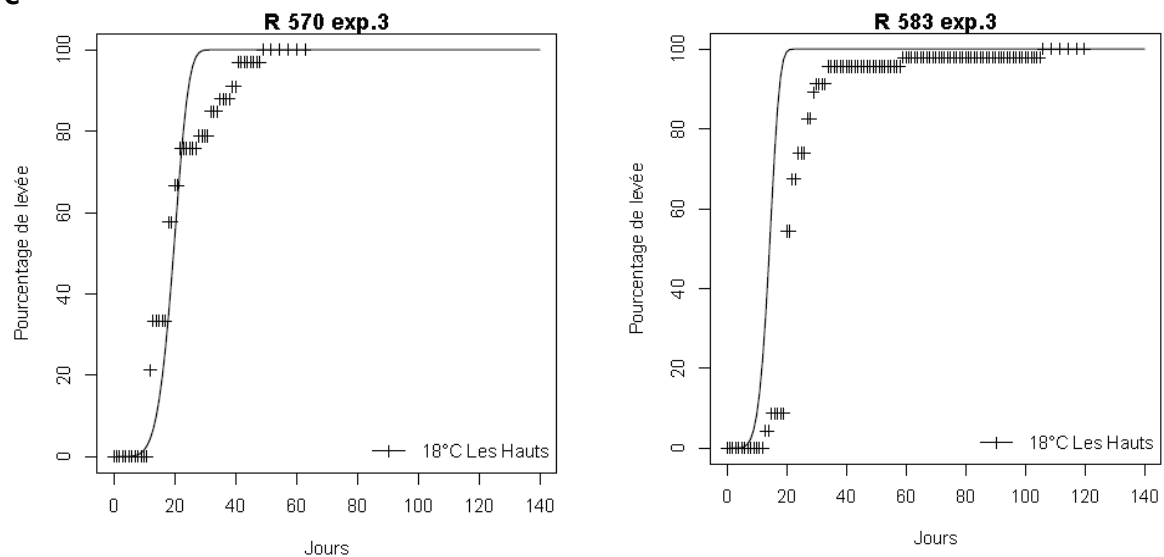
A



B



C



Points et courbes de levées prédites (trait plein) sur boutures ayant levées pour 2 variétés (R570 et R583) dans 3 essais : A-exp. 1, Les taux de levées sont suivis pour 4 températures : 15°C (noir), 19°C (rouge), 23°C (vert), 28°C (bleu) ; B-exp.2 pour 2 températures : 18°C (noir) et 24°C (rouge) ; C-exp.3 : pour 18°C (noire).

Figure 47. Exp. 1, exp. 2 et exp. 3 - Taux de levée observés et simulés des variétés R570 et R583.

5.3.2. Validation du modèle en condition de température constante

Les dynamiques de débourrement ont été analysées à partir des durées observées sur des lots de boutures placées en conditions de températures constantes comprises dans une gamme de 19 à 28°C. Les dynamiques de levée des boutures ayant levées sont présentées pour deux variétés R570 et R583 Figure 47.

Dans l'expérimentation 1, il est à rappeler que le modèle moyen (Tableau 12), qui prédit les dynamiques aux températures 19°C, 21 °C et 28°C pour les deux variétés est bâti à partir des ces données. Par contre les dynamiques prédites à 15°C, hors de la gamme de construction [19°C - 28°C], sont proches des séries de points observés notamment celle de R583 (Figure 47 A).

Dans l'expérimentation 2, qui sert de validation, le modèle prédit pour les deux variétés les levées pour la température à 24°C, (Figure 47 B). Il surestime la vitesse de la deuxième partie du processus pour la température de 18°C.

Pour les deux essais (exp. 1 et exp. 2), soit 6 séries par variété, le modèle prédit des valeurs proches de celles observées pour la durée nécessaire à la demi-levée dans 5 cas sur 6.

Pour l'expérimentation 3, elle aussi utile à la validation, le modèle prédit des valeurs proches de celles observées pour la première partie du processus pour la R570 mais surestime en permanence le taux de levée pour la R583. L'explication provient peut-être du fait que les boutures du lot utilisées pour exp. 3 proviennent de plants transplantés tardivement depuis leur levée en serre (55 jours) et sont issues, au final de cannes de 15 mois, plus vieilles que ne le recommandent les pratiques traditionnelles de plantation avec 9 à 10 mois (Fauconnier and Bassereau, 1970) .

Les prédictions du modèle sur la levée de lots de boutures cultivés à 18 °C se conforment mieux aux observations que les prédictions établies sur la levée de lots de boutures cultivés à 16°C, qui ont un taux maximum et une vitesse de levée inférieurs à ceux prédits. Nous émettons l'hypothèse qu'à cette température, hors de la gamme de construction du modèle, un phénomène de mortalité des boutures explique cette différence, comme nous l'avions déjà supposé pour l'exp. 1 à 15°C.

La différence de levée entre lots peut provenir du fait d'un historique différent entre les boutures (Figure 42) et probablement de qualités différentes ne permettant pas d'exprimer un potentiel de levée du niveau de celui des boutures de l'exp. 1 (utilisé pour la modélisation) et retrouvé dans l'exp. 2.

Dans l'exp. 2 et l'exp. 3, R583, tout comme nous l'avions observé dans l'exp. 1, lève plus tôt et plus vite que R570 (Figure 47 B et C). Les caractéristiques variétales observées, modélisées à partir d'essai à températures constantes en chambre climatiques ont permis de mettre en valeur de meilleures performances relatives de levée de certaines variétés en conditions de température fraîche ; il apparaît opportun de confirmer ces performances en condition de températures fluctuantes c'est-à-dire en serre ou bien au champ.

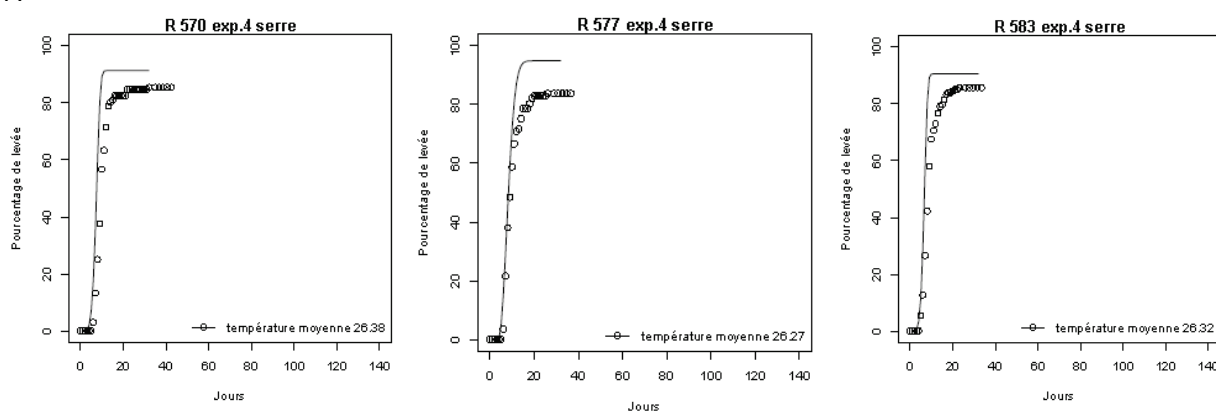
5.3.3. Validation du modèle en condition de température fluctuante

Nous souhaitons connaître la qualité de prédiction du modèle construit vis-à-vis de levée en conditions plus proches de la réalité agricole, c'est à dire en condition de températures fluctuantes (en serre) et en condition réelle (au champ).

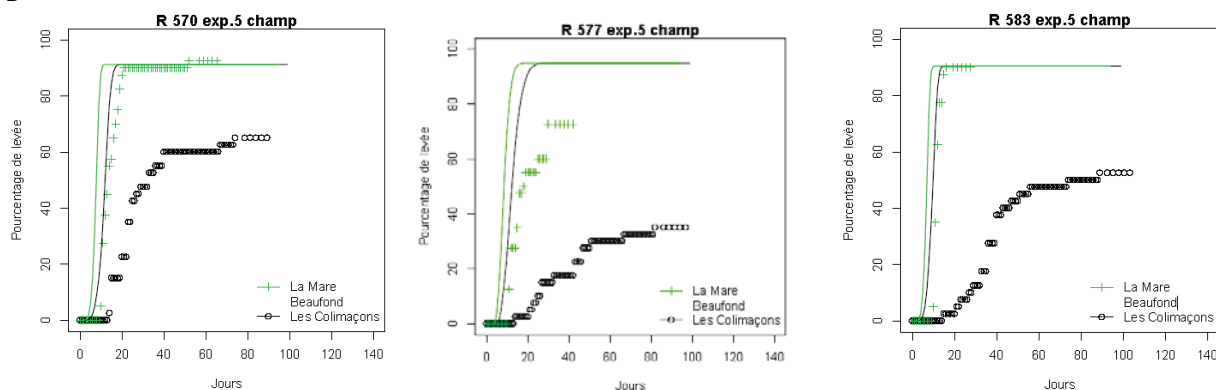
Les expérimentations ont été conduites en serre (exp. 4) et au champ (exp. 5) sur 2 sites de basse et haute altitude. Les variétés R570, R577 et R583 retenues en serre et pour l'expérience au champ sont présentées Tableau 10. Les boutures proviennent de collections dans lesquelles les conduites de culture ont été identiques pour toutes les variétés (Tableau 11). Les températures respectives qui ont prévalu durant l'expérimentation sont présentées sur la Figure 34 page 88.

Les prédictions du modèle sont comparées aux levées observées en serre (exp. 4) et sur le terrain (exp.5) (Figure 48 A et B). Le modèle surestime un peu le taux maximum de levée mais prédit des valeurs proches de celles observées pour les dynamiques de levée des trois variétés en serre (Figure 48 A). Par contre, pour l'essai au champ (exp. 5) ce n'est pas le cas. Pour le site des Bas à La Mare, les prédictions ne sont pas trop éloignées des observations (Figure 48 B) mais pour le site des Hauts, Les Colimaçons, les levées observées sont plus lentes et en plus faible nombre que ne le prédit le modèle.

A



B

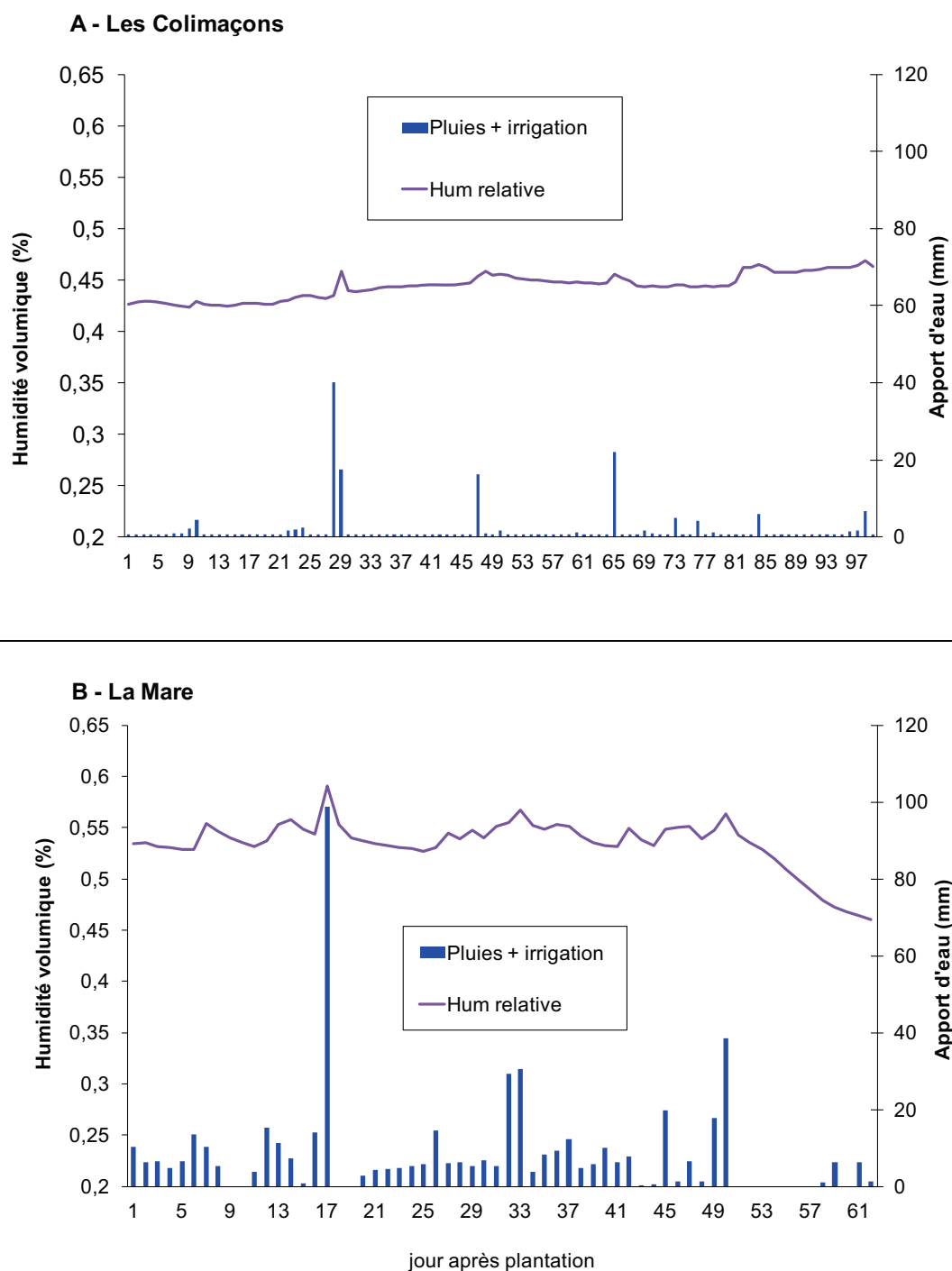


Taux de levée observés (points) et courbes de levées prédites (trait plein) sur boutures levées pour 3 variétés (R570, R577 et R583) dans 2 essais : A-exp. 4, en serre (noir), B-exp.5 pour 2 sites : La Mare (vert) et Les Colimaçons (noir).

Figure 48. Exp. 4 et exp. 5 - Taux de levée observés et simulés des variétés R570, R577 et R583

Tout d'abord la qualité sanitaire ne saurait expliquer cette mauvaise prédiction. Les boutures d'un seul bourgeon ont été préparées avec la même attention pour ne conserver que des boutures saines sans pique ni dégât physique. Les bourgeons trop jeunes (haut de tige) ou trop vieux (bas de tige) ont été écartés de l'essai selon les recommandations obtenues au chapitre II. Les conditions d'humidité mesurées dans le sol, à proximité des boutures ne constituent pas un environnement incompatible avec la levée des boutures (Figure 49). Même si l'humidité relative dans le sol du site de La Mare (de type ferrallitique) est de 10 % plus élevée que dans le sol du site des Colimaçons (de type

andiques - andosols - caractérisés par une eau moins disponible car difficile à extraire même lorsqu'elle est présente) l'irrigation au goutte à goutte sur ce dernier, avec un goutteur au dessus et à proximité de chaque bouture, garanti un apport suffisant pour éviter leur dessèchement.



Au champ entre 0 et 30 cm de profondeur lors du processus de débourrement en jour après plantation sur 2 sites : A, Les Colimaçons B, La Mare.

Figure 49. Exp. 5 - Evolution de l'humidité dans le sol

Les lots de boutures les plus semblables possibles sont requis pour chacun des traitements mais pour des raisons pratiques, à températures fluctuantes, les deux plantations n'ont pu être réalisées simultanément. Les pieds-mères utilisés proviennent bien d'une parcelle unique mais ont été

prélevés à une vingtaine de jours d'écart. Par conséquent, les boutures prélevées sur différents pieds-mères n'ont pas été réparties sur les deux sites comme pour lors des tests en chambres climatiques (exp. 1 et exp.2.). Les 20 jours d'écart représentent une accumulation supplémentaire de 6 % en degré.jour et de 7 % en somme de rayonnement entre les deux lots utilisés pour l'exp. 5 (Tableau 11 page 91) et ce, à une période (15 avril et 6 mai) où les conditions climatiques sont favorables à des modifications hormonales au niveau de la tige³⁰. Ainsi, il subsiste un doute, sur la qualité des boutures utilisées sur le site des Colimaçons, plus âgées qui aurait pu induire un retard de levée.

L'explication la plus plausible provient cependant de la limite qui réside dans notre hypothèse de départ. L'utilisation d'une température seuil et de l'élaboration d'un modèle à partir de somme de degré.jour au dessus de ce seuil se base sur un principe de linéarité de l'effet de la température sur la gamme étudiée. Un degré proche de la température seuil compte par exemple autant qu'un degré acquis en haut de la gamme. Il est probable que les sommes de températures quotidiennes soient surestimées.

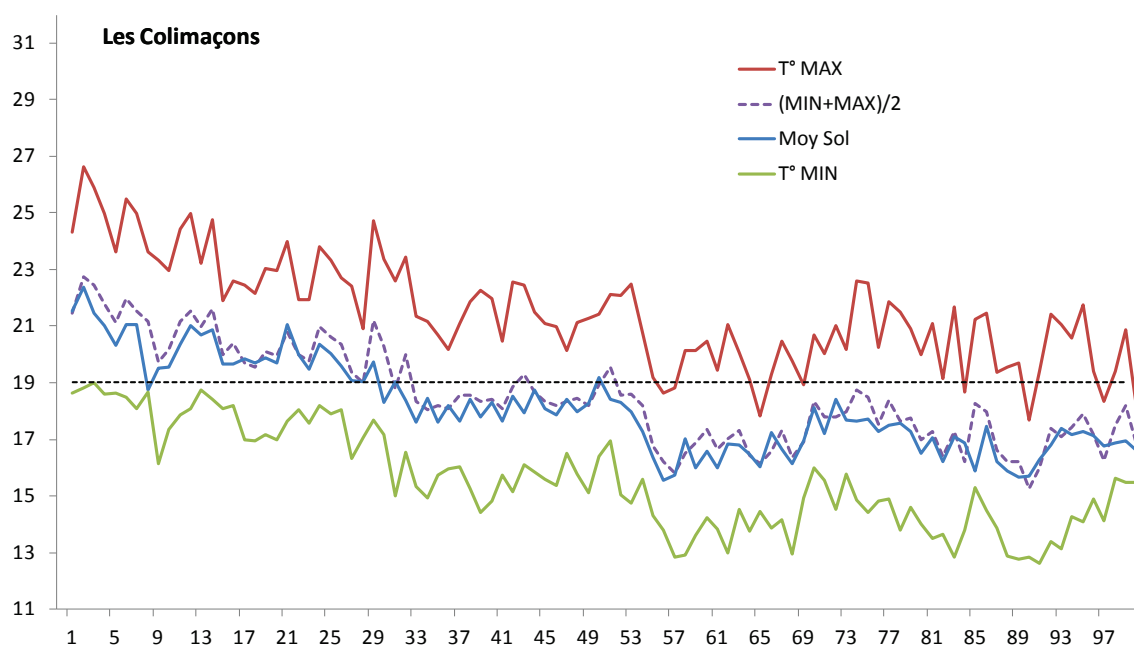
Par ailleurs, il est possible que les températures moyennes utilisées relevées et utilisées pour la prédiction ne reflètent pas l'influence des périodes durant lesquelles la température était hors de la gamme de construction de celui-ci, c'est-à-dire en dessous de 19°C (Figure 50). Les températures minimales sont systématiquement en dessous de 19°C. C'est-à-dire que tous les jours, les boutures ont été confrontées à des températures basses, hors de la gamme de construction du modèle.

Enfin, comme nous l'avions supposé en condition de température constante à 15°C (Cf. Observations page 95) des phénomènes de mortalité peuvent expliquer le taux de levé plus faible. Smit (2011) a observé une levée³¹ très faible dans une enceinte climatique annoncée à 15°C dont la température était de 16,3°C ±4,4°C.

Le modèle aurait ainsi surestimé la levée en condition de température fluctuante proche de la température extrême basse de construction du modèle.

³⁰ Cette période correspond, à La Réunion à la période où la durée du jour favorise la floraison qui s'accompagne de modifications dans les équilibres hormonaux **Van Dillewijn C. 1952. *Botany of Sugarcane*, Waltham, Mass: Chronica Botanica Co.**

³¹ La plantation concerne la levée pour 3 variétés de boutures d'un seul bourgeon.



La température est relevée à proximité des boutures au cours du processus de débourrement en jour après mise en terre : Minimum, moyenne absolue, moyenne agricole $[(\text{Min}+\text{Max})/2]$ et maximum. La température de 19°C est représentée par un trait pointillé noir.

Figure 50. Exp. 5 - Températures journalières en °C dans le sol sur le site des Colimaçons

En résumé, la surestimation du modèle sur le site des Colimaçons peut provenir du mauvais calage de celui-ci en conditions de température basse, non comprises dans la gamme de température de construction du modèle ou bien d'un problème de boutures dont la qualité du deuxième lot, un peu plus âgé, n'est pas comparable à celle du premier utilisé à La Mare.

6. Conclusions

Afin de se rapprocher des performances des variétés et de comparer leur potentiel relatif, l'utilisation de boutures de bonne qualité et les plus homogènes possible est essentielle. Il convient de préparer conjointement les lots devant être testés, que se soit au sein d'une même variété ou entre variétés, pour des tests à différentes températures. Cette démarche est essentielle car pour une même variété, des lots de boutures de sources différentes peuvent en effet révéler des capacités très différentes.

En condition de température constante, l'étude des levées en chambres climatiques de boutures saines, sélectionnées constitue un moyen d'évaluer l'impact de modification de température des conditions de plantation. Les taux de levée maximum peuvent être comparés entre températures mais aussi entre variétés et constituent un premier critère majeur pour notamment discriminer les variétés pour leur adaptation aux basses températures. Les taux de levée obtenus à basse température (15°C) sont très variables selon les variétés.

La modélisation constitue un moyen de représenter la dynamique correspondante au processus pour chaque variété respectivement et de la prédire à d'autres températures à l'intérieur de la gamme d'étude. La température est au cœur du modèle de prédiction de levée. Le modèle se base sur une

les sommes de degré.jour nécessaires, au dessus d'une température seuil pour atteindre un taux de levée. Il permet aussi de prédire le temps nécessaire (en degré.jour au dessus du seuil) pour atteindre une étape de développement comme la demi-levée (50% de boutures ayant levées) ou qualifier l'étalement de la levée (durée nécessaire entre 25% et 75% de la levée). Le modèle permet de comparer les capacités de levée entre variétés et montre clairement des différences à basse température. Le modèle obtenu, basé sur plusieurs paramètres comme la latence, la vitesse, le taux maximum de la levée démontre que l'ensemble du processus est ralenti à basse température et que les écarts entre variétés adaptées ou non se creusent à mesure que la température baisse.

Au cours des trois expérimentations présentées, soit quatre nouvelles séries à différentes températures constantes (16°C, 18°C et 24°C) et où de différentes provenances (Les Haut et Les Bas), les meilleures performances de R583 se confirment par un taux et une vitesse de levées (au stade de la demi-levée) supérieurs à ceux de la variété R570. Les caractères de précocité affichés par la variété R583 s'expriment aussi dans tous les essais, parfois même pour des séries aux boutures de moins bonne qualité.

A température fluctuante, le modèle reflète bien la réalité observée en environnement contrôlé (en serre) dans une gamme de températures compatible avec la gamme de construction du modèle. Par contre, en condition de terrain (au champ), les cinétiques de levée observées sont éloignées des prédictions pour la seconde moitié de la dynamique. La qualité des boutures, mais plus probablement le fait que l'exp. 5 se situe hors de la gamme de validité du modèle, associé à la manière de comptabiliser les degré.jour à basse température, constituent la limite à la bonne prédiction de la levée selon notre modèle.

Afin de déceler une explication aux échecs de levée en l'absence de mesures sur les hormones, un lien a été recherché entre le profil moyen de teneur en sucres des tiges-mères. Le profil de teneur en sucres, témoin de la maturité est comparé pour les différents lots de tiges-mères d'âge et de provenances différents. Pour une même variété, des lots pris à des moments différents sur une même parcelle ont bien des profils de teneur en sucres différents. La maturité augmente avec le temps. Des tiges mères provenant des Hauts, plus âgées peuvent s'avère moins matures que celles provenant des Bas. Il convient, par conséquent de considérer l'âge physiologique, c'est-à-dire une combinaison de température et rayonnement accumulés qui représentent le vécu de la tige-mère. **La levée ne peut être lié directement à la teneur en sucres ni des boutures du haut de tiges ni pour celles du bas.**

Résumé Chapitre III

Débourrement

Etat de l'art et objectifs

La phase de débourrement des bourgeons est primordiale pour l'implantation d'une culture de canne à sucre, particulièrement dans un milieu contraint par températures basses, comme celui des Hauts de La Réunion. L'objectif de ce chapitre est de caractériser l'influence de la température sur le débourrement des bourgeons et trouver l'origine des différences variétales observées.

Méthode

La possibilité d'utiliser des boutures d'un seul bourgeon pour caractériser la levée est un fait acquis, il est appliqué dans toutes les expérimentations ultérieures. Pour que les lots de boutures soient le plus homogènes possible, il faut de plus une sélection sévère et soigneuse des boutures (boutures en bon état sanitaire et issues de la partie médiane de la tige-mère, cf. Chapitre II).

Les boutures de plusieurs variétés aux comportements contrastés ont été placées en conditions d'humidité de sol favorables au débourrement à différentes températures, en chambre climatique (température constante), en serre (température fluctuante), et même, pour quelques-unes, en conditions de plein champ. En conditions contrôlées, les températures choisies couvrent une large gamme allant pour les valeurs basses jusqu'aux températures observées dans les Hauts, à la période de plantation la plus défavorable.

Les températures sont mesurées dans le sol, à proximité des bourgeons.

Une équation de forme sigmoïde (Weibull) est employée pour caractériser les dynamiques de levée cumulée, cela en vue de comparer les comportements des différentes variétés à différentes températures. Cinq paramètres caractérisent la courbe : le taux maximum de levée, la vitesse maximale du processus, la température seuil, le temps de latence entre la mise en conditions de débourrement et le début de débourrement et un coefficient de dissymétrie de la courbe (forme souvent plus étalée pour la 2^{ème} partie de la population que pour la première). Deux autres grandeurs sont calculées à partir de cette équation : la durée nécessaire à la réalisation de la levée pour la moitié de la population et l'étalement de la levée des boutures ayant levé entre deux taux définis, par exemple entre 25 et 75 %.

Les échecs de levée sont comparés à l'histoire de la tige-mère dont provient chaque bouture. La provenance (altitude ou non) des boutures est étudiée ainsi que l'âge en jours des plantes-mères ou leur âge physiologique (somme de températures depuis leur plantation), ainsi que la maturité de la tige (profil de teneur en sucres) afin d'expliquer les différences de comportements (proportion maximale et durée moyenne) observées entre plusieurs expérimentations.

Principaux résultats

Les résultats prouvent l'effet de la température, aussi bien sur les proportions de levées que sur les durées nécessaires observées en jours. Des différences de comportement existent aussi entre variétés. Par ailleurs, les proportions de bourgeons levés sont plus faibles à la plus basse température (15°C) et sont différentes entre variétés, certaines ne lèvent pas du tout à 15°C.

L'ajustement des paramètres de l'équation, pour chaque variété, donne un jeu de paramètres permettant de représenter le comportement de chaque variété à toutes les températures, pour un jeu d'expériences. Ces paramètres n'ont pas encore été testés sur d'autres lots de boutures.

Les courbes, bien que n'utilisant pas les expériences à la température la plus basse, montrent que les différences de propriétés de débourrement entre températures sont d'autant plus fortes que les températures baissent.

Concernant les échecs de débourrement, aucun lien n'a pu être démontré entre la teneur en sucres des boutures et leur capacité à lever, ce qui confirme les observations antérieures (Chapitre II), qui avaient conduit à l'idée d'absence de limitation du débourrement par la teneur en sucres. La teneur en sucres –et son gradient entre les entrenœuds– bien qu'indicateur de l'âge de la tige –au sens de l'accumulation de ses sucres– ne peut pas être utilisé comme un indicateur de la capacité de débourrement des bourgeons.

Conclusion

La température influence considérablement le processus de débourrement. Le modèle thermique utilisé, limité à une gamme de températures où son effet est supposé linéaire, prédit de façon satisfaisante la levée à température constante. En conditions réelles (au champ), la moins bonne prédiction est sans doute liée à l'apparition de facteurs agronomiques limitants.

Chapitre IV : Installation du couvert végétal en année de plantation

1. Introduction

Le débourrement des bourgeons de la bouture plantée constitue le premier stade phénologique de la canne à sucre. Nous avons montré que la température joue un rôle majeur dans cette étape et que les variétés de canne n'ont pas des aptitudes de levée similaires vis-à-vis des basses températures. Les variétés dont la levée est adaptée aux basses températures lèvent plus tôt, plus vite et ont un taux de levée supérieur, elles lèvent plus. C'est un avantage indéniable pour la phase d'implantation de la culture cependant une bonne levée n'est pas une condition suffisante pour garantir l'adaptation d'une variété à un environnement plus frais. Ainsi, nous souhaitons vérifier si les variétés performantes à basse température lors du débourrement des bourgeons conservent leurs facultés concernant les processus ultérieurs impliqués dans l'installation du couvert végétal.

Le processus de débourrement-levée du bourgeon de canne à sucre a lieu sous terre, en phase sombre, il est localisé à la zone proche du bourgeon de la bouture. Ce processus fait appel à des mécanismes de divisions et d'élongation cellulaires qui sont possibles grâce aux réserves nutritives que renferme la bouture. Si les processus impliqués lors de l'installation du couvert végétal font appel eux aussi, aux mêmes mécanismes cellulaires, ils sont multiples (tallage, émission de feuilles, élongation de tige ...), ont lieu en phase lumineuse, ne sont pas restreints à une seule localisation au niveau de la plante et intègrent les notions de répartition des assimilats. Il existe une influence du photopériodisme au travers de la photosynthèse sur la vitesse d'apparition des feuilles (Clerget et al., 2008). Aussi, des signaux provenant de parties éloignées de l'apex, et présentant des températures différentes de celui-ci agissent sur le développement de celui-ci (McMaster et al., 2003). Les conditions sont donc très différentes entre le processus de débourrement et les suivants. Quelle va être dans ces conditions l'influence de la température et plus particulièrement des températures plus fraîches ?

Ce chapitre sera par conséquent consacré à l'étude de plusieurs processus liés à l'installation de la surface foliaire de la plante après la phase de levée sur plusieurs sites à différentes altitudes correspondant à diverses températures. Selon les processus, les effets de la température ou les effets de site influent-ils dans le même sens, de façon constante une même variété ? Si non, existe-t-il un équilibre qui sous entend un phénomène de compensation entre processus qui pourrait diminuer les écarts dans l'installation de la plante ?

Bonhomme (2000) définit le développement de la plante comme une « suite d'évènements repérables qui modifient qualitativement (germination, floraison...) ou quantitativement (nombre de feuilles, fleurs...) la structure de la plante ». Il précise que ces évènements se déroulent durant une période ou une durée finie correspondant pour la plante à un « parcours ». Les « **parcours de développement** » de la plante au sens de Bonhomme (2000) seront approchés par l'étude des processus impliqués. L'influence de la température ou plus particulièrement de l'environnement (du site) sera recherchée sur ces processus. Pour chacun d'eux, le comportement des variétés sur plusieurs sites, à plusieurs âges sera comparé.

Le classement entre variétés obtenu en phase de débourrement est-il conservé pour les étapes suivantes du cycle ?

La surface totale du feuillage correspond au produit des surfaces des feuilles vertes par le nombre de tiges. Plusieurs processus complémentaires sont ainsi mis en jeu et se déroulent de façons simultanées ou consécutives. Outre les processus liés à l'apparition de ces organes, l'émission de talles influe elle aussi sur la surface foliaire totale. Elle est directement dépendante de l'émission des feuilles chez les autres graminées et elle est régulé par le rayonnement incident, avec une compétition d'ailleurs plus important intra ligne qu'entre les lignes chez la canne à sucre (Singels and Smit, 2002). La courbe d'évolution de l'interception du rayonnement est le résultat des dynamiques de mise en place des tiges et des feuilles. La mesure du taux d'interception du rayonnement par le couvert végétal synthétise par conséquent l'ensemble des dynamiques mais sa dynamique permet-elle de mettre en évidence les adaptations de comportement éventuellement observées ?

2. Matériel et méthode

2.1. Dispositif et mesures

Le dispositif mis en place sur les deux sites de La Mare et des Colimaçons³² pour nos travaux sur le débourrement a été conservé pour les mesures relatives à l'étude du développement des tiges et des feuilles. L'unité d'étude est une placette de 5 lignes de 6 mètres linéaires³³. Chaque variété sera étudiée dans 4 placettes réparties sur 4 blocs (Figure 51A et B et Photo 5 page 136). Les contraintes techniques de mise en place et de suivi des essais sur site conjugués aux contraintes de temps nous ont conduits à réaliser moins de mesures que pour l'étude du processus de débourrement levée.

Les « parcours de développement » caractérisant les processus liés aux tiges et à ceux des feuilles sont étudiés en pratique, à partir des 10 pieds de canne à sucre (ou souche issue de la plantation d'une bouture à un seul bourgeon) situés au milieu du rang central de chaque placette sur une longueur de 3 mètres (Figure 51B). Ces pieds sont repérés et seront suivis jusqu'à fermeture du couvert végétal pour des observations sur leur tige primaires et les feuilles associées ainsi que sur leur tiges secondaires.

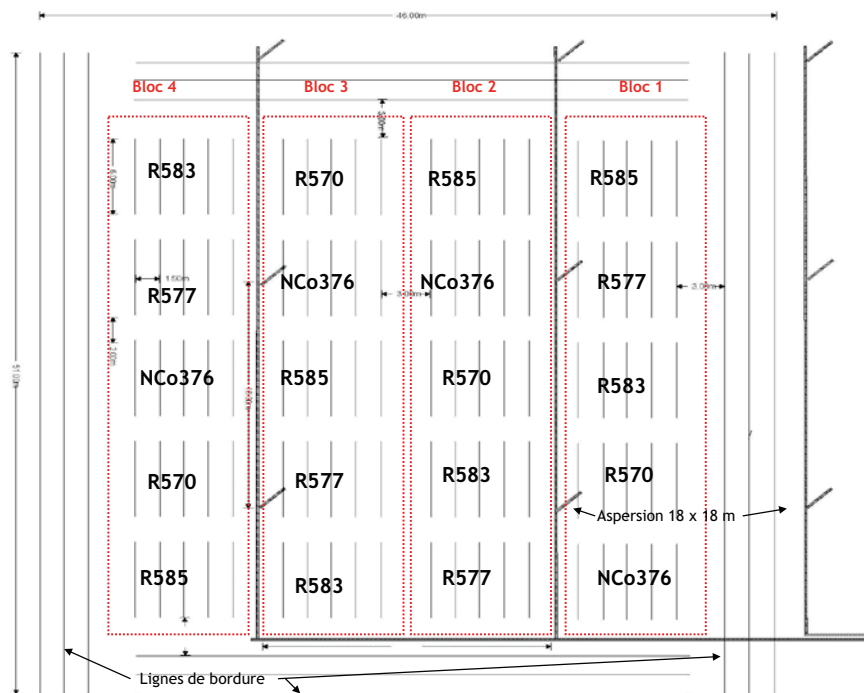
L'évolution de la population de tiges ou tallage (Cf. Chapitre 1.2. La canne à sucre : généralités - page 23) diffère selon les variétés et la période de plantation (Singels et al., 2005). La population augmente généralement pour atteindre un pic puis diminue pour tendre vers un optimum qui correspond au nombre de tiges usinables qui seront récoltées. Le nombre de tiges en présence fait l'objet d'un comptage exhaustif à plusieurs dates ainsi qu'à la récolte.

Dépendant du cycle de culture et, de l'espacement entre lignes le pic représentera de 2 à 3 fois la population finale (Singels and Smit, 2002). Outre les dynamiques respectives des variétés sur chaque site et plus particulièrement la phase d'installation (hors sénescence), nous nous sommes intéressés aux durées nécessaires par variétés pour que leur population de tige corresponde en nombre à celle des tiges usinables présentes à la récolte.

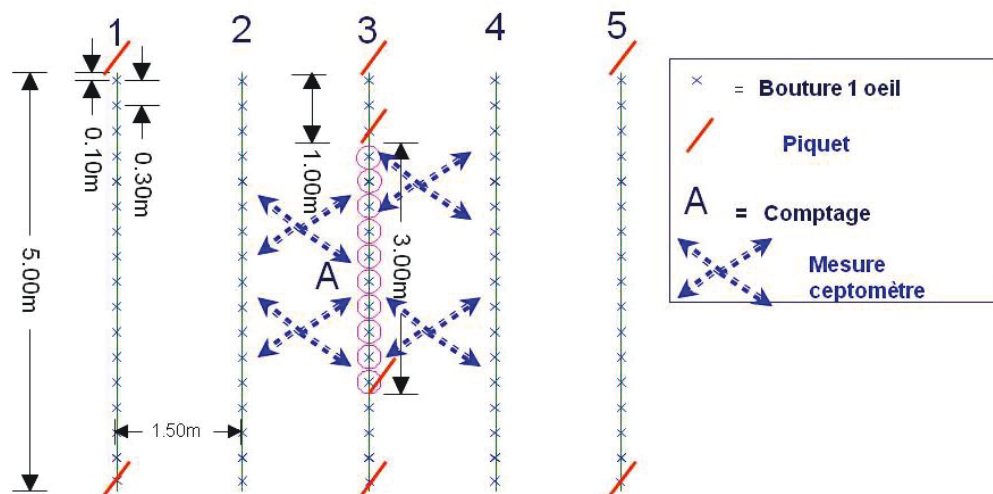
³² Un troisième site, situé à Beaufond chez M Barau X. à une altitude de 450 m, intermédiaire aux deux autres sites faisait parti du dispositif original mais a été abandonné. Une levée erratique due aux dégâts par des lièvres, dès la levée sur les jeunes pousses de certaines variétés nous a contraints à supprimer les données de levées et abandonner le site. Les mesures ultérieures prévues n'ont pu être réalisées.

³³ Seulement 5 mètres linéaires pour Colimaçons pour des limites pratiques de longueur de parcelle.

A

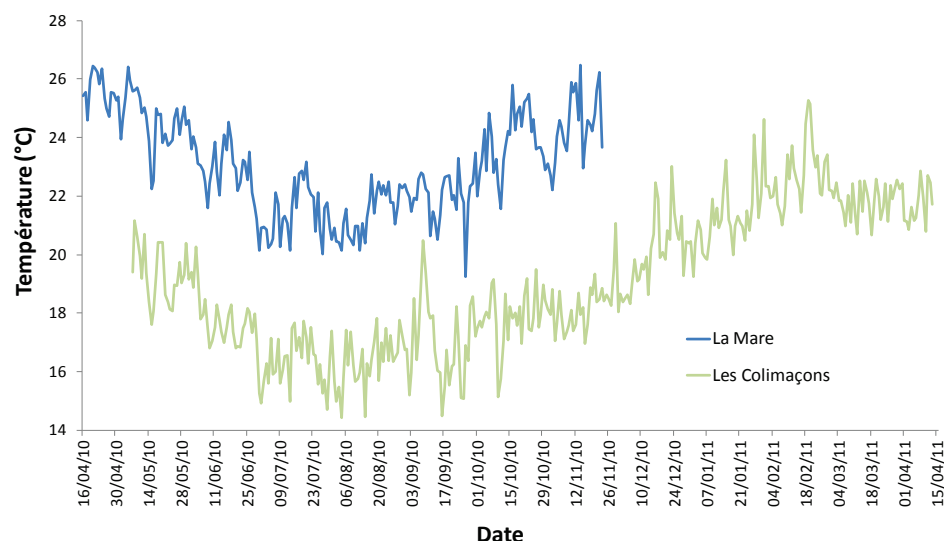


B



A : 4 Blocs de 5 variétés (exemple de La Mare) ; B : placette élémentaire (5 lignes) de boutures espacées de 30 cm, localisation des mesures biométriques et des mesure d'interception foliaire au ceptomètre (exemple des Colimaçons).
Figure 51. Exp. 5 - Plans de l'essai

Le suivi de l'élongation des tiges est effectué par mesure de la longueur de la tige primaire de chaque pied depuis sa base jusqu'au dernier ochréa visible (i.e. intersection de la gaine et du limbe de la dernière feuille ligulée), les hauteurs moyennes des tiges sont comparées à plusieurs dates.



Depuis la plantation jusqu'à la date des dernières mesures sur les sites de La Mare et des Colimaçons (La Mare du 16/04/2010 au 23/11/2010 et Les Colimaçons du 7/05/2010 au 13/04/2011).

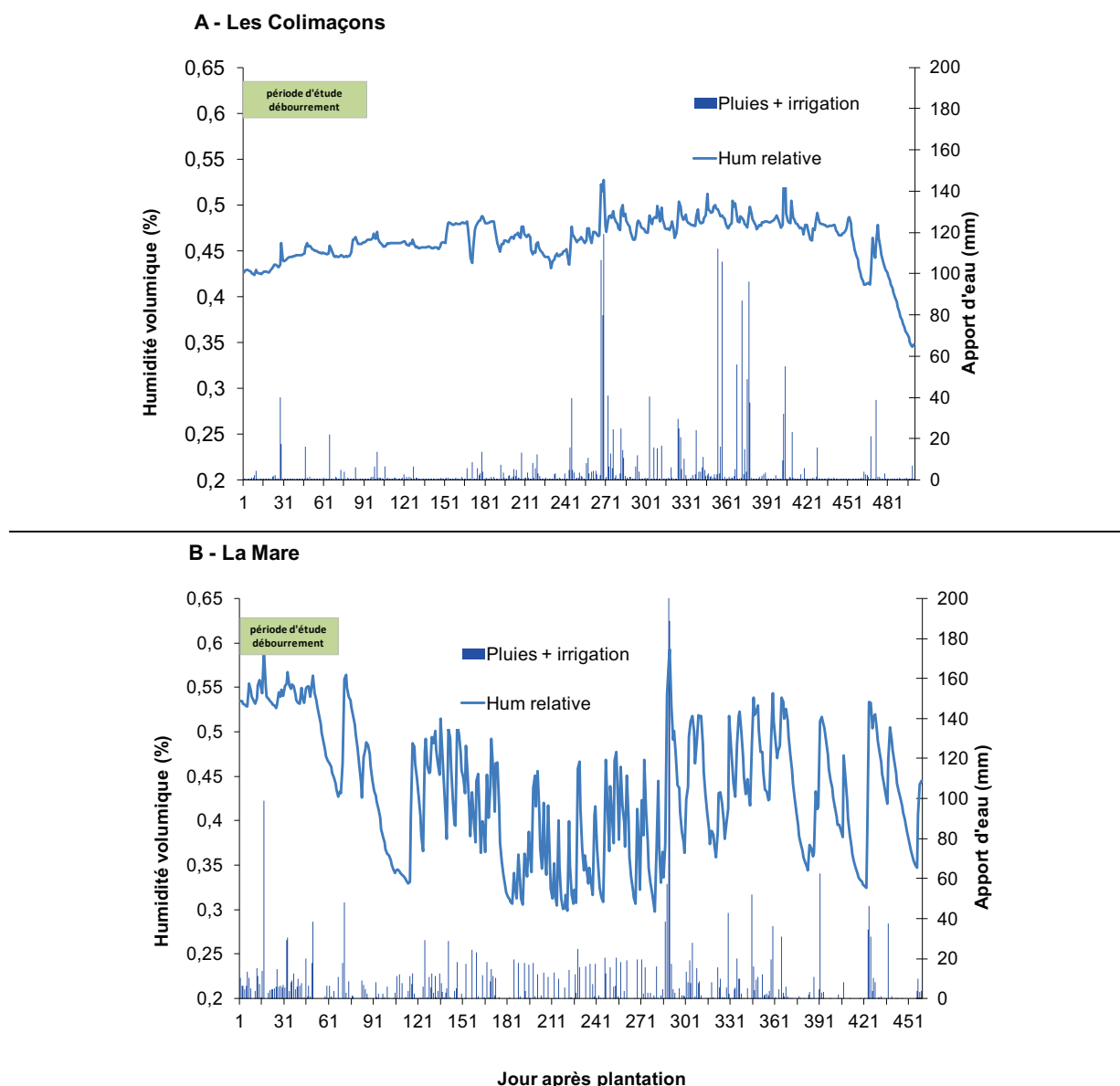
Figure 52. Exp. 5 - Températures moyennes agricoles journalières

Nous avons travaillé sur le rythme d'apparition des feuilles, leur taille et la surface du feuillage. Le nombre, le rang, et la surface des feuilles vertes ligulées, ayant achevées leur croissance, donc adultes (Ruget et al., 1996) sur la tige primaire sont relevés et étudiés selon les sites et variétés. La surface unitaire d'une feuille est égale au produit de sa longueur et de sa largeur maximum multiplié par un coefficient de forme estimé à 0,75 (Bonhomme R. et al., 1982) et confirmé par Ruget et al. (1996).

Ce coefficient obtenu sur maïs sera appliqué à la canne à sucre³⁴. La surface des feuilles sera étudiée en fonction de leur rang respectif d'émission.

Les mesures d'interception de rayonnement du couvert végétal (Cf. Chapitre 4.3 page 44) ont été effectuées au ceptomètre (LP-80 Accupar de marque Decagon Device, INc.) sur les deux sites. L'appareil mesure successivement l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)¹⁰ en 4 points situés de part et d'autre de la ligne centrale. Le ceptomètre (règle de 80 cm équipé de 8 séries de 10 capteurs) est orienté vers 4 directions en croix autour de chaque point de mesure (Figure 51B).

³⁴ 250 mesures de la longueur et de la largeur ont été réalisées concomitamment à une mesure de la surface « vraie » au planimètre. Ces mesures destructives ont été obtenues sur des feuilles des 5 variétés de cannes à sucre en cycle de repousse sur ce même dispositif. Le coefficient obtenu par variété n'est pas significativement différent de 0,75 (résultats non présentés).



Au champ entre 0 et 30 cm de profondeur sur l'ensemble du cycle en jour après plantation sur 2 sites – A : Les Colimaçons ; B : La Mare.

Figure 53. Exp. 5 - Evolution de l'humidité relative et apports d'eau

Comme conseillé par Bonhomme (2000), nous avons souhaité obtenir des températures plus représentatives de celles des organes en développement. La température de l'air sous abri (Figure 52), la pluviométrie et l'humidité dans le sol (Figure 53) ont été mesurées de façon continue et à fine résolution, vu leur importance à l'aide d'une centrale d'acquisition et de sondes de la marque Campbell.

2.2. Traitement des données

2.2.1. Démarche générale

Notre objectif est d'étudier successivement les processus liés à l'émission des tiges primaires et à leur croissance, à l'émission de feuilles, à la surface foliaire des tiges primaires, et pour finir, nous avons étudié l'interception du rayonnement par le couvert végétal.

Souhaitant cibler l'étude sur la période où se déroulent les processus en écartant les effets parasites, la fin de la phase de débourrement des bourgeons est considérée comme début de la période d'étude retenue. La période d'étude est décalée d'une durée correspondant à la levée de 50 % des bourgeons ayant levés au final (demi-levée), observée respectivement pour chaque variété et chaque site (Cf. Chapitre III) soit de 89, 72, 66, 80, 50 jours respectivement pour les variétés NCo376, R570, R577, R583 et R585 aux Colimaçons et de 30, 26, 30, 32, 22 jours pour ces mêmes variétés sur la Mare excepté pour l'interception de rayonnement par le couvert végétal.

Pour chaque processus, nous allons chercher à modéliser l'effet de la température et de la variété, site par site. Les variétés seront comparées entre elles, afin de savoir si elles ont des comportements différents. Le niveau de signification des tests statistiques est fixé à 5%. Selon la disponibilité et la qualité des données, la construction d'un modèle robuste n'a pas été possible pour tous les processus. C'est notamment le cas pour l'émission des tiges pour lequel nous n'avons modélisé que la partie ascendante de la dynamique³⁵ et l'élongation des tiges pour laquelle l'analyse a été réduite à des comparaisons à différentes dates après plantation.

2.2.2. Démarches particulières

Les démarches particulières d'analyse sont résumées ci-après :

a) Emission de tiges

Les densités de tiges mesurées sont ramenées à l'hectare et présentées en jour et degré.jour après la phase de débourrement. La température seuil de 16°C est choisie et appliquée car elle est communément utilisée comme référence pour les processus liés au développement de la tige (Inman-Bamber, 1994, Singels et al., 2005, Zhou et al., 2003). La modélisation du processus de tallage est finalement réalisée en fonction des jours à l'aide d'un modèle logistique³⁶. Les paramètres du modèle sont comparés par un test de rapport de vraisemblance.

Une autre approche de l'installation du couvert consiste à étudier la durée nécessaire par site et par variété pour atteindre le nombre de tiges qui sera égal à celui présent à la récolte. Il s'agit du délai pour mettre en place le niveau de population de tiges « usinables ». Les densités de tiges ont ainsi été mesurées au moment de la coupe soit à 500 jours après plantation pour Les Colimaçons et à 459 jours pour La Mare. Les nombres de jours après débourrement respectivement nécessaires par variété et pour les deux sites pour atteindre cette population sont présentés sous forme d'un classement³⁷. Nous avons choisi d'étudier le taux de survie, il correspond au ratio de la population de tiges présente à la récolte sur celle atteinte au moment du pic (Singels and Smit, 2002).

b) Hauteur de tiges

Pour la hauteur de tige, la modélisation de la croissance de la tige est réalisée en fonction du nombre de jours après débourrement, via un modèle de type exponentiel. Comme précédemment, pour chaque variété, les paramètres du modèle seront comparés via un test de rapport de vraisemblance.

Dans un deuxième temps, les hauteurs de tiges à plusieurs dates sont comparées à l'aide d'une analyse de variance suivi d'un test de Tukey en cas d'effet d'un paramètre.

³⁵ De plus, cette phase de mise en place du couvert végétale correspond à la problématique de notre étude.

³⁶ Différentes fonctions de lien ont été testées (logit, log, log-log, cloglog et cauchy). La fonction au plus petit critère AIC, qui ajuste le mieux les observations du processus sera retenue.

³⁷ Ces durées seront obtenues à l'aide du modèle bâti pour les données de la Mare et par résolution graphique pour celles des Colimaçons.

c) Emission de feuilles

Nous avons décidé de modéliser la relation d'émission de feuille en degré.jour par un modèle d'analyse de la covariance. Martiné (2003) a obtenu³⁸ une température seuil d'émission de feuilles de 12°C ($T_b = 12$) pour sur la variété R570. Cette référence est choisie comme température seuil de référence pour les 5 variétés étudiées. Les variables explicatives seront les degré.jour, la variété et l'interaction variété x degré.jour. Des tests de Tukey de comparaison de moyennes deux à deux sont réalisés pour comparer les pentes et les ordonnées à l'origine des droites de régression.

d) Surface des feuilles

L'analyse de la surface des feuilles est réalisée en fonction de leur rang d'émission, les mesures relatives à un rang de feuilles n'ont été conservées que si un minimum de 10 mesures était disponible. Une analyse de la covariance est utilisée pour déceler les effets éventuels du rang ou de la variété sur la surface.

e) Fermeture du couvert végétal

Les moyennes des 16 mesures d'interception du PAR effectuées sur chacun des 4 blocs des 5 variétés sont utilisées pour construire un modèle. Au vu de l'aspect asymptotique de la dynamique (cf. Figure 23 page 45) nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle logistique³⁹.

3. Résultats

3.1. Emission de tiges

Le traitement des données relatives à l'émission de tiges est décomposé en 3 étapes :

- Une présentation des données brutes en jour après la phase de débourrement par site et par variété,
- Une analyse sur la partie ascendante de la dynamique en jour après débourrement,
- Un classement des variétés par site selon des durées nécessaires en jour après débourrement pour atteindre le niveau de population de tiges équivalent à celui présent à la récolte.

3.1.1. Comparaisons entre sites et entre variétés

Les résultats de mesure des tiges montrent de nouveau une forte hétérogénéité sur le site des Colimaçons (Figure 54). **Pour toutes les variétés, on observe à la fois une mise en place plus lente et un nombre de tiges plus faible sur le site des Colimaçons** comparé à celui de La Mare (Figure 55A).

Sur le site de La Mare, le pic de population de tiges correspondant à une densité comprise entre 300 000 et 330 000 tiges/ha est atteint à 150 jours après débourrement alors qu'aux Colimaçons, le pic situé autour de 200 000 tiges/ha est atteint entre 200 et 250 jours (Figure 54 et Figure 55A). Les dynamiques des 3 variétés R570, R583 et R585 sont similaires.

³⁸ La méthode de recherche de température seuil utilisée par cet auteur correspond à la première famille décrite Chap. 2.2 Comptabiliser la température (page 74).

³⁹ Différentes fonctions de lien ont été testées (logit, log, log-log, cloglog et cauchy). La fonction au plus petit critère AIC, qui ajuste le mieux les observations du processus sera retenue.

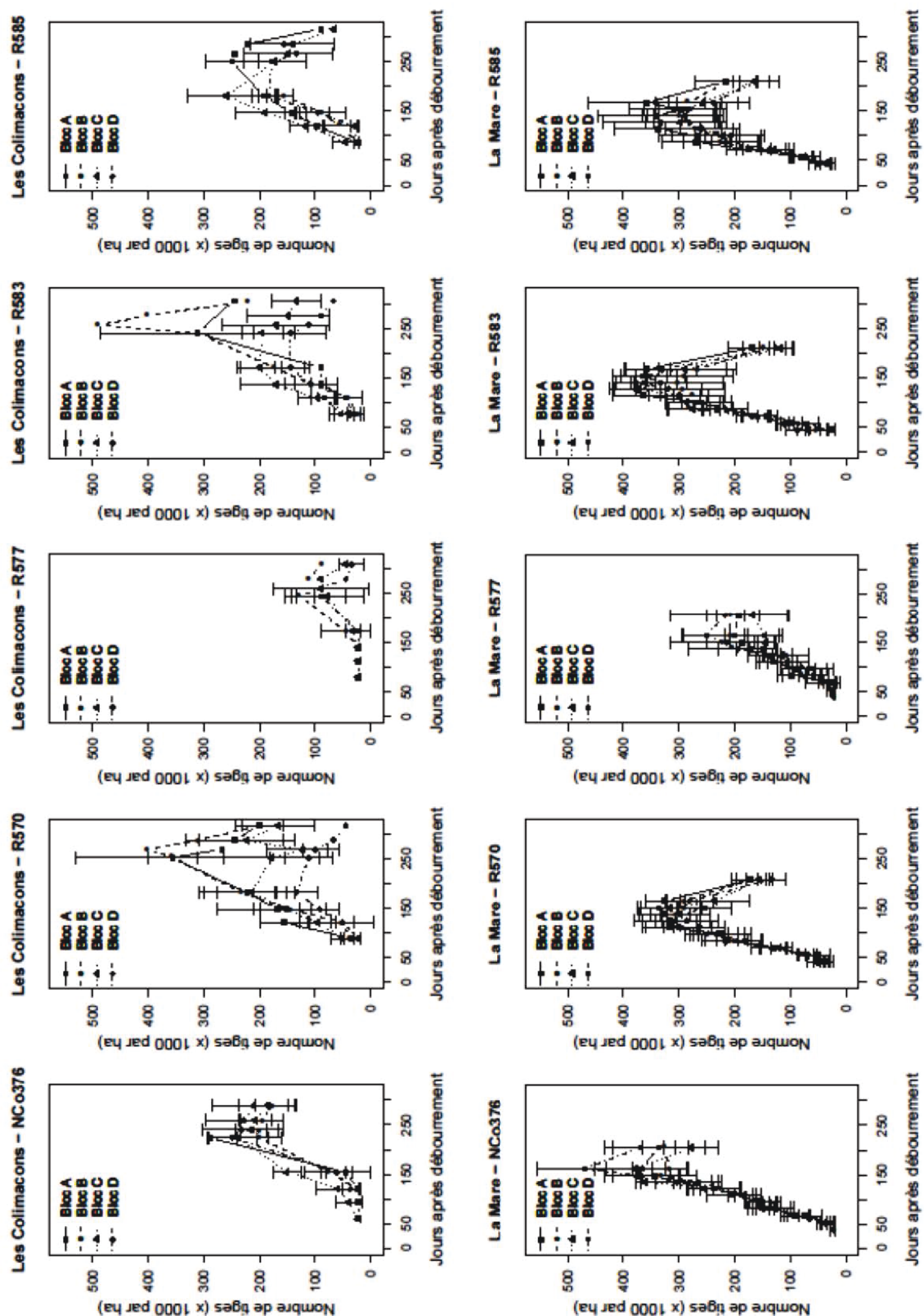
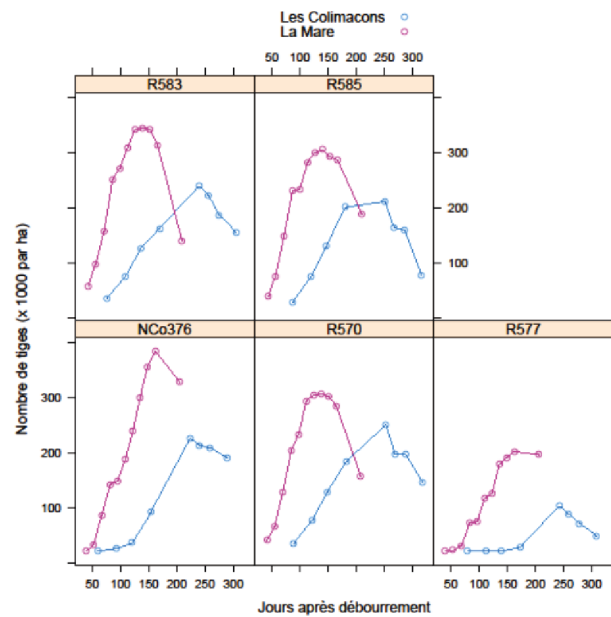


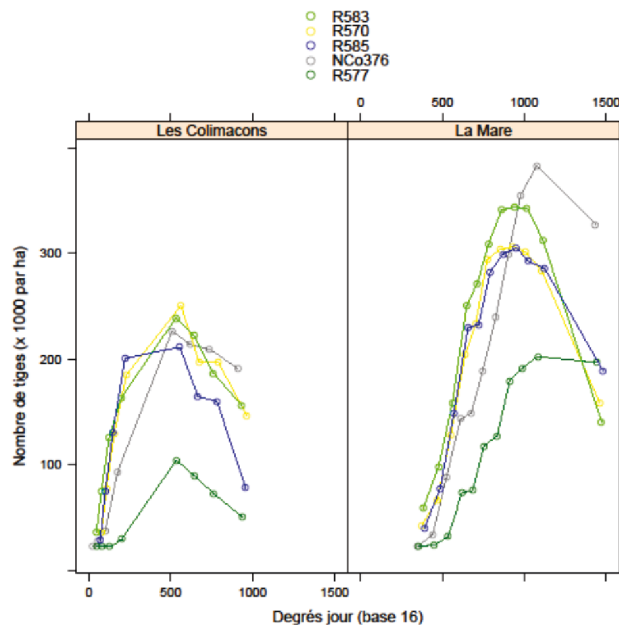
Figure 54. Nombre de tiges par hectare pour 5 variétés sur 2 sites.

Sur la projection en degré.jour avec $T_b = 16^\circ\text{C}$ (Figure 55B1), **le retard dans l'installation des tiges de la variété R577 observé est remarquable**. Cette variété possède l'accroissement le plus tardif et le niveau maximum de tiges le plus faible sur les 5 variétés et pour les deux sites étudiés. La variété **NCo376**, présente mais dans une moindre mesure, un accroissement de son nombre de tiges plus tardif. Par ailleurs, le pic atteint est par contre plus élevé que les autres sur le site de La Mare mais équivalant aux autres sur celui des Colimaçons et (Figure 55B1). Une température seuil de 12°C explique mieux la différence des dynamiques entre les deux sites que celle de 16°C habituellement prise pour référence (Figure 55B2) .

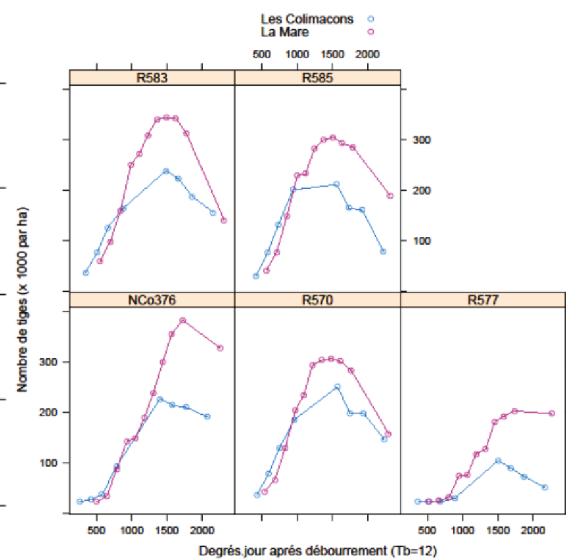
A



B1



B2



Après débourrement A : par variété pour 2 site en jour, pour 5 variétés en degré.jour ($T_b = 16^\circ\text{C}$) ; B1 : par site ; B2 : par variété ($T_b = 12^\circ\text{C}$).

Figure 55. Evolution du nombre moyen de tiges par hectare

3.1.2. Installation de la population de tiges

Voulant privilégier l'étude de la mise en place du couvert végétal, nous avons modélisé la partie ascendante de la relation d'émission de tiges en fonction des jours après débourrement pour les 5 variétés. Un seul site a été retenu : La Mare⁴⁰. La fonction de lien de type logit a le critère AIC le plus faible et représente donc le mieux le phénomène (Équation 3).

Modèle logistique de type logit

$$y = \frac{c}{1 + e^{-a(x-b)}}$$

Avec y = le nombre de talles par hectare (10^3) x = le nombre de jour après débourrement

a, b, c : les paramètres du modèle

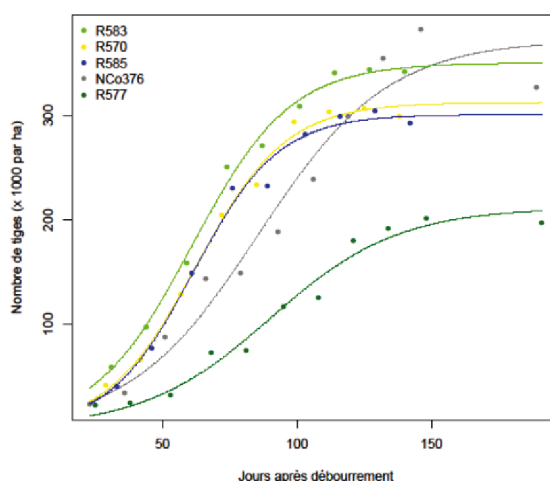
Équation 3. Equation du modèle représentant la mise en place de la population de tiges sur le site de La Mare.

Tableau 13. Valeurs estimées des paramètres du modèle d'émission de tiges

		NCo376	R570	R577	R583	R585
Vitesse maximum (a)	($\times 10^{-2}$)	4,13 ^{ns} (0,75)	6,05 ^{ns} (0,52)	4,20 ^{ns} (0,58)	5,48 ^{ns} (0,43)	6,38 ^{ns} (0,74)
Nb de jours pour ½ pic (b)		101 ^b (6)	76 ^a (2)	105 ^b (4)	73 ^a (2)	73 ^a (2)
Nb maximum de tiges/ha (c)	($\times 10^3$)	371 ^c (26)	312 ^b (7)	212 ^a (12)	351 ^c (8)	301 ^b (8)

Valeur des paramètres; pour chaque paramètre les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5% ; n.s., non significatif; écarts type (entre parenthèses).

Il existe bien des différences dans l'installation des tiges selon les variétés sur le site de La Mare (Tableau 13). L'analyse statistique effectuée sur les valeurs des paramètres ne montre pas de différence sur la vitesse maximum d'émission de tiges entre les variétés. Par contre, il existe des groupes de variétés différenciés par leur nombre de jours pour atteindre le demi-pic (b) ou bien par la valeur du pic de leur population de tige (c) lui-même (Figure 56). Le test statistique confirme la rapidité d'installation de tiges observée pour les variétés R583, R585 et R570.



Nombre de tige moyen (10^3 /ha) en jours après débourrement jusqu'au pic de population de tiges pour 5 variétés sur le site de la Mare. Points observés et courbes simulées selon le modèle logistique.

Figure 56. EXp. 5 - Evolution du nombre moyen de tiges sur le site de La Mare

⁴⁰ Les données obtenues aux Colimaçons sont très hétérogènes et trop peu nombreuses pour obtenir un modèle robuste.

3.1.3. Durée pour atteindre le niveau équivalent à la population de tiges récoltées

Pour chaque variété et pour chaque site, le nombre de jours nécessaires pour atteindre l'équivalent de la population de tiges récoltées a été classé (Tableau 14).

Nombre de tiges par hectare au pic, à la récolte, taux de survie, nombre de jours pour atteindre le niveau de population de tiges présent à la récolte et classement (entre parenthèses) pour les 2 sites et les 5 variétés.

Tableau 14. Densité de tiges

	R 583	R 585	R 570	NCo376	R 577
La Mare - récolte à 459 jours (JAP)					
Pic (Nb maximum de tiges/ha)	356 000	301 000	312 000	373 000	212 000
Nombre de tiges par ha - observées à la récolte	89 000	54 000	85 000	114 000	75 000
(classement)	(2)	(5)	(3)	(1)	(4)
Taux de survie (en %)	25	18	27	30	35
Nombre de jours (JAD)*	33	38	46	68	76
(classement)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Les Colimaçons - récolte à 500 jours (JAP)					
Pic (Nb maximum de tiges/ha)	240 000	215 000	250 000	230 000	110 000
Nombre de tiges par ha - observées à la récolte	79 000	104 000	109 000	127 000	54 000
(classement)	(4)	(3)	(2)	(1)	(5)
Taux de survie (en %)	33	48	44	55	49
Nombre de jours (JAD)**	110	135	140	175	200
(classement))	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

* d'après modèle obtenu Chap 3.1.2

** estimé graphiquement

Sur les deux sites la variété NCo376 atteint un nombre de tiges à la récolte supérieur aux autres variétés (+ 28 % à La Mare et + 17 % aux Colimaçons par rapport aux secondes variétés). Les classements obtenus sur les pics de population entre variétés ne sont pas identiques d'un site à un autre. La variété R585 a produit, par exemple moins de tiges relativement aux autres variétés à La Mare (classement 4/5) qu'aux Colimaçons (classement 2/5). A La Mare, les taux de survie sont faibles, la compétition entre tiges a donc été plus importante. Ces taux de survie correspondent à la limite basse des ratio annoncés dans la littérature (Singels and Smit, 2002) avec un taux particulièrement faible de 18% pour la variété R585 dû à un phénomène de verse. Les taux observés aux Colimaçons correspondent à une compétition moins forte des tiges entre elles sauf pour la variété R583 avec 33 %.

Les variétés ont ainsi des comportements différents (effet G) mais peuvent aussi avoir des comportements différents d'un site à un autre (interaction GxE).

Nous avons modélisés la dynamique d'installation des tiges pour un site, comparés les pics de population et les niveaux de population de tige à la récolte. Des différences variétales existent, certaines variétés émettent plus de tiges mais moins rapidement tandis que d'autres émettent très rapidement des tiges mais ces dernières ne survivront qu'en moindre nombre jusqu'à la récolte. Concernant la durée nécessaire pour atteindre le nombre de tiges usinables sur le site de La Mare (Tableau 14), un premier groupe composé des variétés R583, R585 et R570 atteint la population correspondant au nombre de tiges récoltées entre 33 et 48 jours. Ce groupe est suivi des variétés NCo376 avec 68 jours et R577 avec 76 jours. Sur le site des Colimaçons les variétés se classent dans le même ordre, mais elles ont besoin de 3 à 4 fois plus de temps pour atteindre ce niveau de population de tiges usinables. Pour chaque site les durées entre les variétés les plus rapides et les moins rapides oscillent pratiquement du simple (R583) au double (R577).

3.2. Hauteur de tige

Les disparités entre blocs sont certes toujours conséquentes sur le site des Colimaçons en comparaison à La Mare mais plus faibles comparées aux autres composantes du couvert végétal précédemment étudiées (Figure 57).

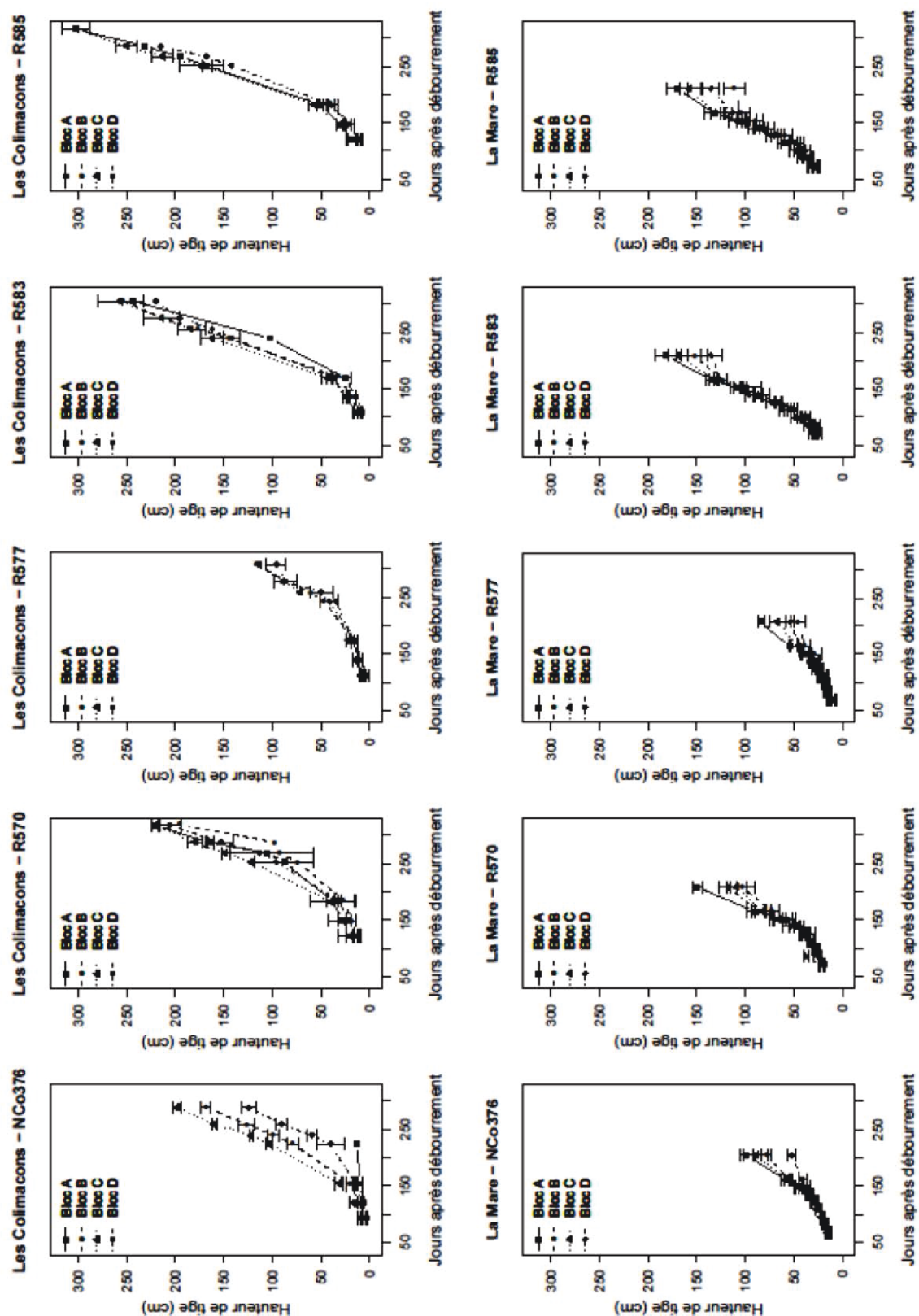
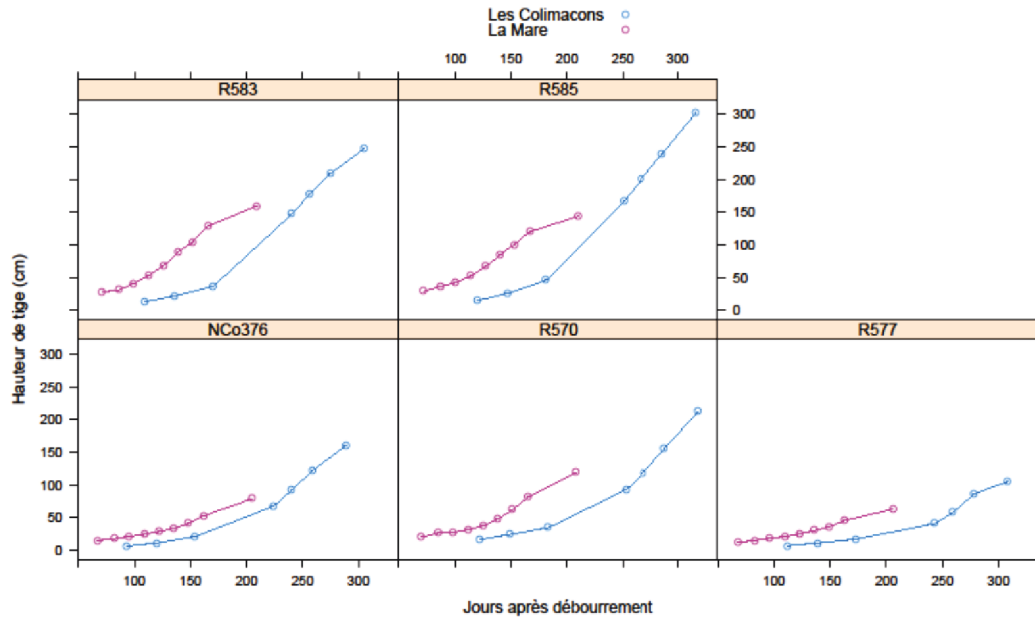


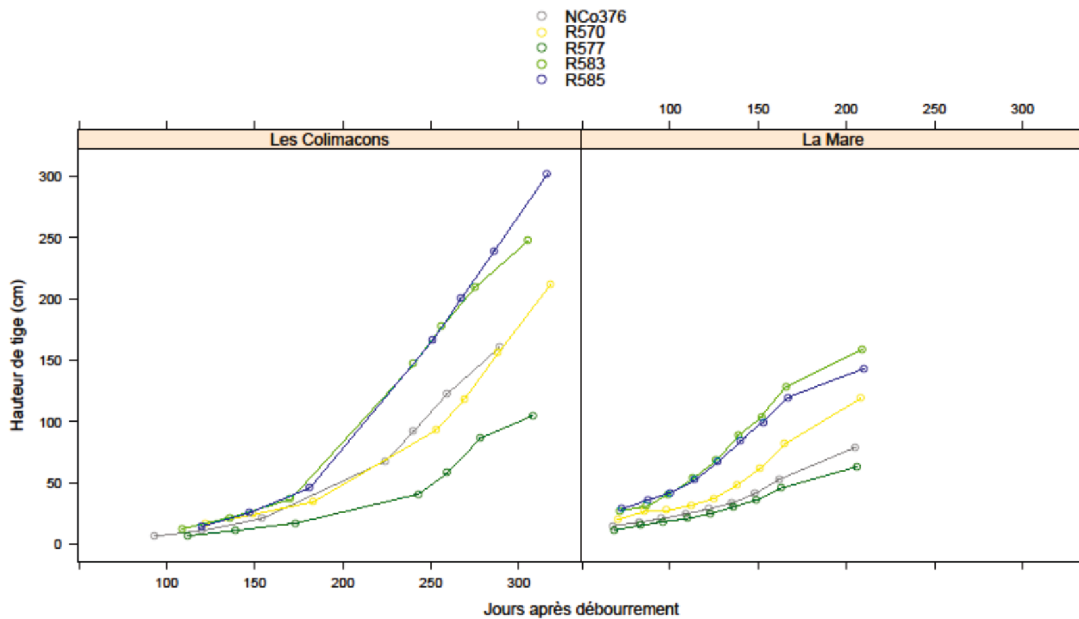
Figure 57. Hauteur de tige (cm) pour 5 variétés sur 2 sites.

Les données relatives aux hauteurs moyennes de tiges relevées sur les 2 sites pour les 5 variétés révèlent des croissances contrastées entre les variétés et d'un site à l'autre (Figure 58A et B).

A



B



En jour après débourrement, A : par variété pour 2 site ; B, par site pour 5 variétés.
Figure 58. Evolution de la hauteur moyenne des tiges

La croissance des tiges débute plus tardivement et est plus lente sur le site des Colimaçons que sur celui de La Mare et le trio des variétés « de tête » reste inchangé (Figure 58B).

La dernière mesure pour chaque variété, effectuée sur le site de La Mare laisse apparaître un ralentissement de la croissance des tiges pour l'ensemble des variétés. La parcelle a été confrontée à une interruption d'approvisionnement en eau d'irrigation qui a entraîné un déficit hydrique décelable sur les données d'humidité relative du sol à partir du 180^{ème} jour après plantation (Figure 53B). Les données concernées ont été supprimées lors des analyses ultérieures.

3.2.1. Modélisation de la croissance de la tige

Une première approche consiste à modéliser le processus de croissance de tiges après débourrement sur le site de La Mare⁴¹ via une fonction exponentielle (Équation 4). Les paramètres du modèle sont présentés (Tableau 15). Une représentation graphique du modèle au regard des données est présentée Figure 59.

Modèle exponentiel

$$y = b * e^{(ax)} + \varepsilon$$

Avec y = la hauteur de tige x = le nombre de jour après débourrement ε : résidu

a et b : paramètres du modèle

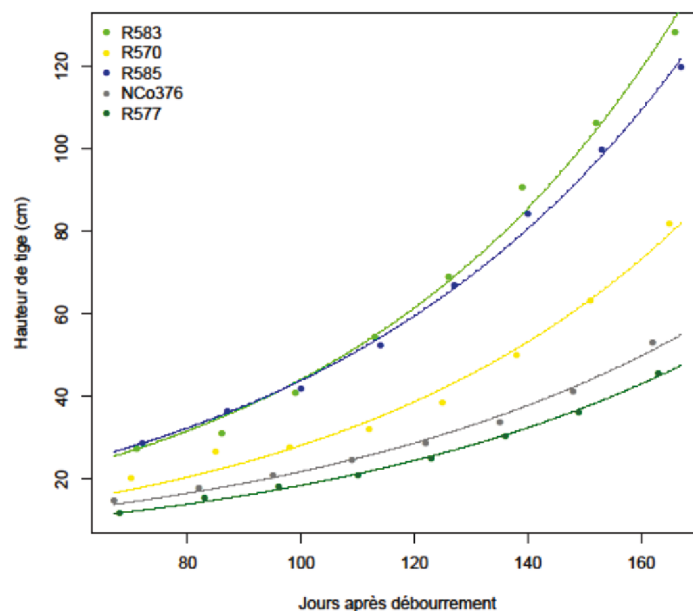
Équation 4. Equation du modèle de croissance de tige pour le site de La Mare et valeurs des paramètres pour 5 variétés.

Tableau 15. Valeurs estimées des paramètres du modèle de croissance de tiges sur le site de La Mare

	NCo376	R570	R577	R583	R585
Vitesse du processus (a)	0,013 ^{ns} (0,001)	0,016 ^{ns} (0,001)	0,014 ^{ns} (0)	0,017 ^{ns} (0,001)	0,015 ^{ns} (0)
Hauteur de tige à l'origine (b)	5,49 ^{ab} (0,44)	5,71 ^{ab} (0,79)	4,50 ^a (0,26)	8,41 ^{bc} (0,89)	9,60 ^c (0,60)

Valeur des paramètres; pour chaque paramètre les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5% ; n.s., non significatif; écarts type (entre parenthèses). La vitesse est exprimée en logarithme népérien.

L'analyse démontre que **sur le site de La Mare, les vitesses de croissance entre les variétés ne sont pas différentes**. Les différences entre variétés existent dès le départ de la période d'étude du processus c'est-à-dire dès la fin de la période de débourrement.



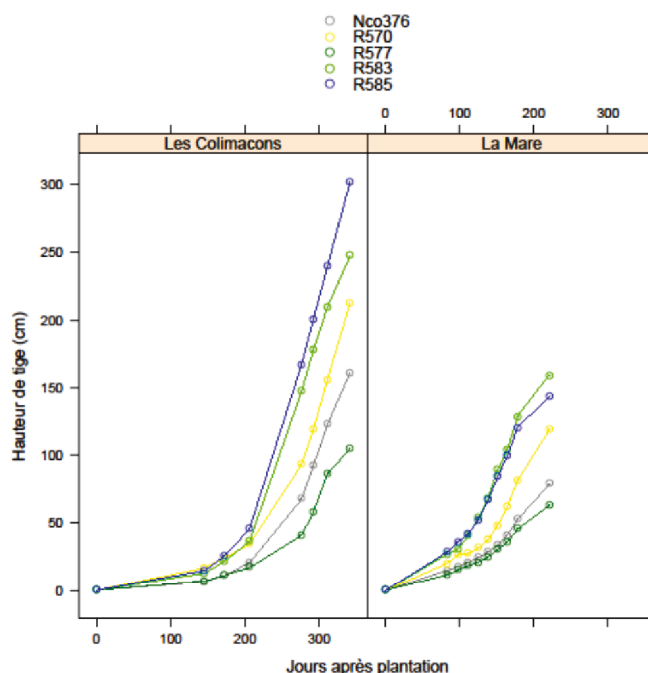
En jours après débourrement pour 5 variétés sur le site de la Mare. Points observés et courbes simulées selon le modèle exponentiel.

Figure 59. Evolution de la hauteur moyenne des tiges

⁴¹ Les données obtenues aux Colimaçons sont là encore très hétérogènes et trop peu nombreuses pour obtenir un modèle robuste.

3.2.2. Comparaison des hauteurs par date

Une seconde approche nous permet d'analyser les données collectées sur les sites des Colimaçons⁴² et de la Mare.



En jour après plantation, A : par variété pour 2 site ; B : par site pour 5 variétés.

Figure 60. Evolution de la hauteur moyenne des tiges

Compte tenu de la nature des données, les tests ont été effectués en comparant les mesures effectuées simultanément sur les différentes variétés c'est-à-dire par date correspondant nécessairement aux jours après plantation (Tableau 16).

Tableau 16. Résultat des tests de variance sur le processus de croissance des tiges de 5 variétés sur 2 sites.

J A P	Les Colimaçons							La Mare							
	145	172	206	276	292	311	341	83	98	111	125	138	151	164	178
R585	b	b	c	c	c	c	d	c	bc	c	c	c	c	c	c
R583	ab	ab	bc	bc	c	bc	c	c	c	c	c	c	c	c	c
R570	b	b	bc	ab	b	ab	bc	b	b	b	b	b	b	b	b
NCo376	a	a	ab	a	ab	a	b	a	a	ab	ab	a	a	a	a
R577	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

Les variétés aux lettres identiques à une date (en jour après plantation - JAP) n'ont pas des hauteurs de tiges significativement différentes au seuil de 5 % d'un test de Tukey.

Des différences entre variétés sont observées sur les deux sites. Sur le site des Colimaçons, les écarts de hauteur de tige entre variétés se creusent dans le temps. A la dernière date, les tiges de la variété R585 sont les plus hautes devant celles de R583 non distincte de celles de R570. Les tiges de la variété NCo376 sont significativement plus longues que celles de R577, qui sont les plus courtes.

⁴² Il est à noter que le nombre de tige se réduit au fur et à mesure des dates. Par conséquent les tests perdent de la puissance.

3.3. Emission de feuilles

3.3.1. Vitesse d'émission de feuilles

Les émissions de feuilles ont été très irrégulières selon les plants et les blocs sur le terrain des Colimaçons (Figure 61).

La projection du nombre moyen de feuilles émises par plants et par bloc pour chaque variété (Figure 62A) met en évidence que (i) **l'émission de feuille débute plus tardivement** et (ii) **l'émission de feuille elle est plus lente aux Colimaçons qu'à La Mare**. Au moment de la dernière mesure effectuée à La Mare soit autour de 150 jours après débourrement, les cannes à sucres plantées dans les Hauts, sur la station des Colimaçons possèdent en moyenne, par variété, entre 5 feuilles (R570 et NCo376) et 10 feuilles (R577, R583 et R585) de moins que celles des Bas. Cinquante jours minimum seront nécessaires aux cannes des Hauts pour combler ce retard. Il faut préciser que ce retard de développement ne tient pas compte de l'éventuel retard déjà pris lors de la phase précédente de débourrement car la période d'observation d'émission des feuilles est décalée. En effet, nous avons pris soin d'enlever, à compter de la date de plantation, l'équivalent de 2 fois le nombre de jours nécessaires à la demi-période de débourrement, c'est-à-dire entre 2 à 3 fois plus de jours, selon les variétés, pour Les Colimaçons que pour La Mare.



Source : clichés C. Poser

Photo 5. Parcelles d'essai A, Lors de la mise en place de l'essai aux Colimaçons ; B, Au stade de levée à La Mare (EXp.5).

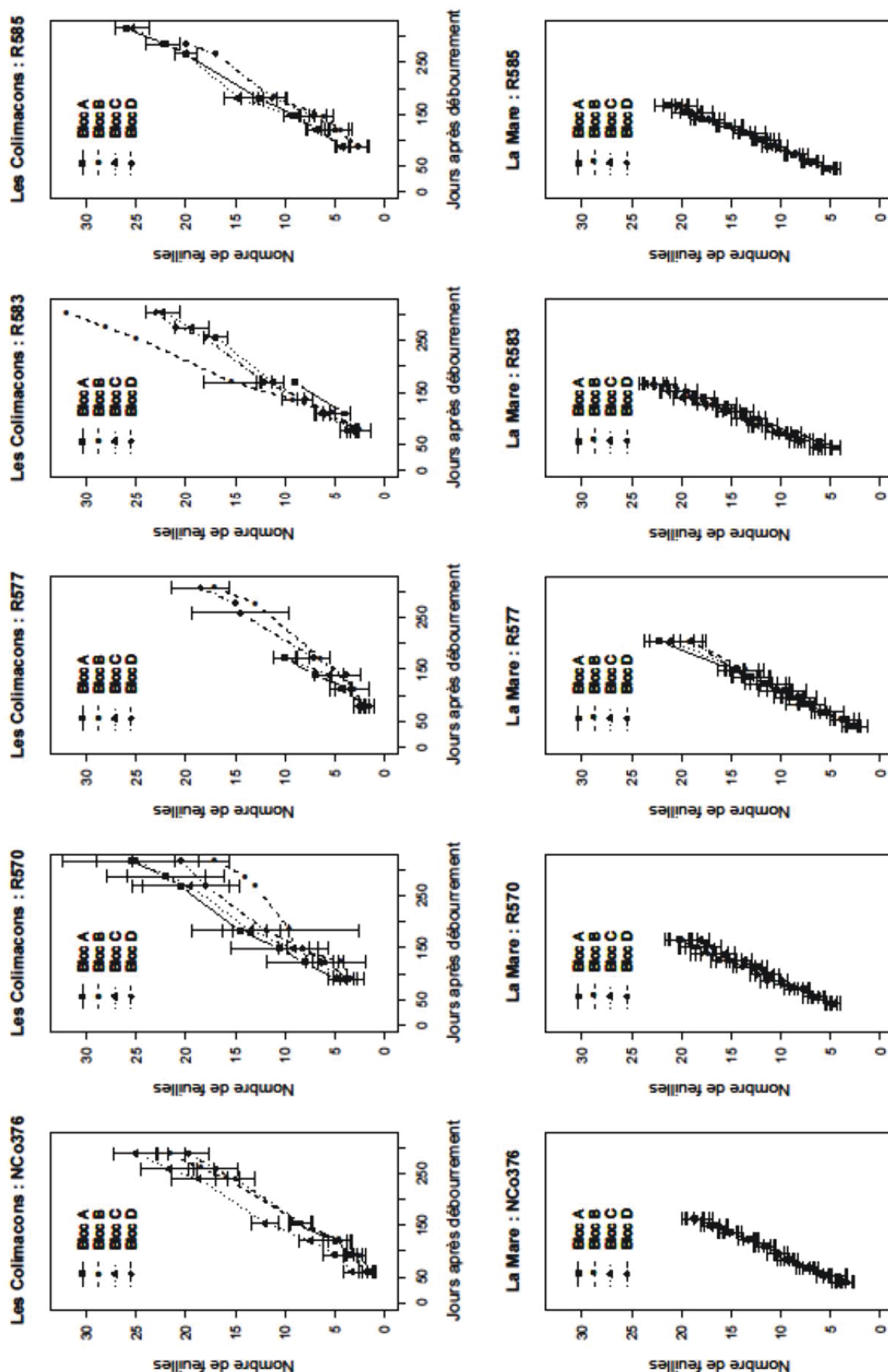
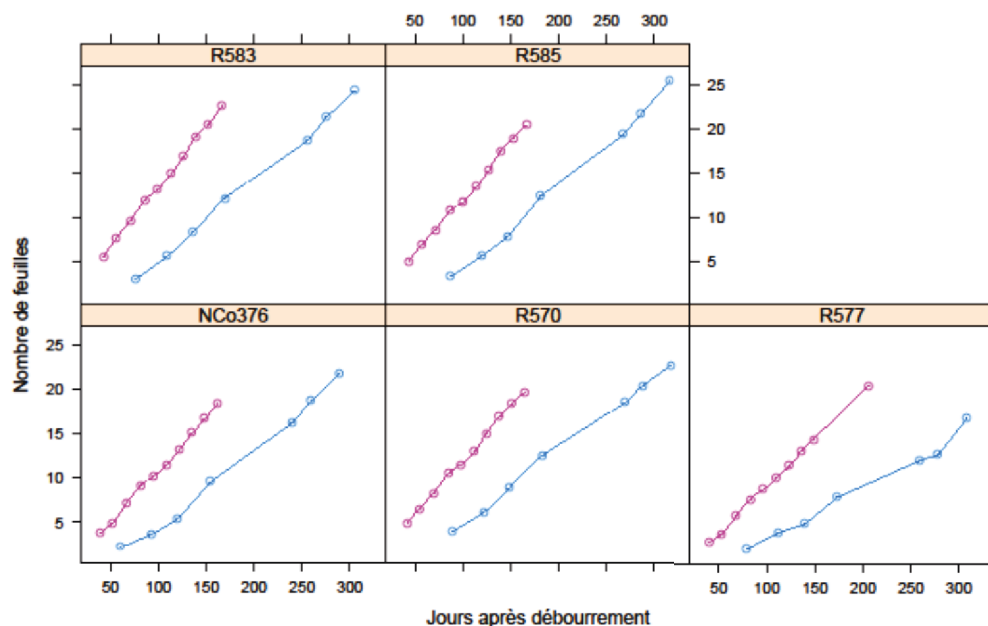
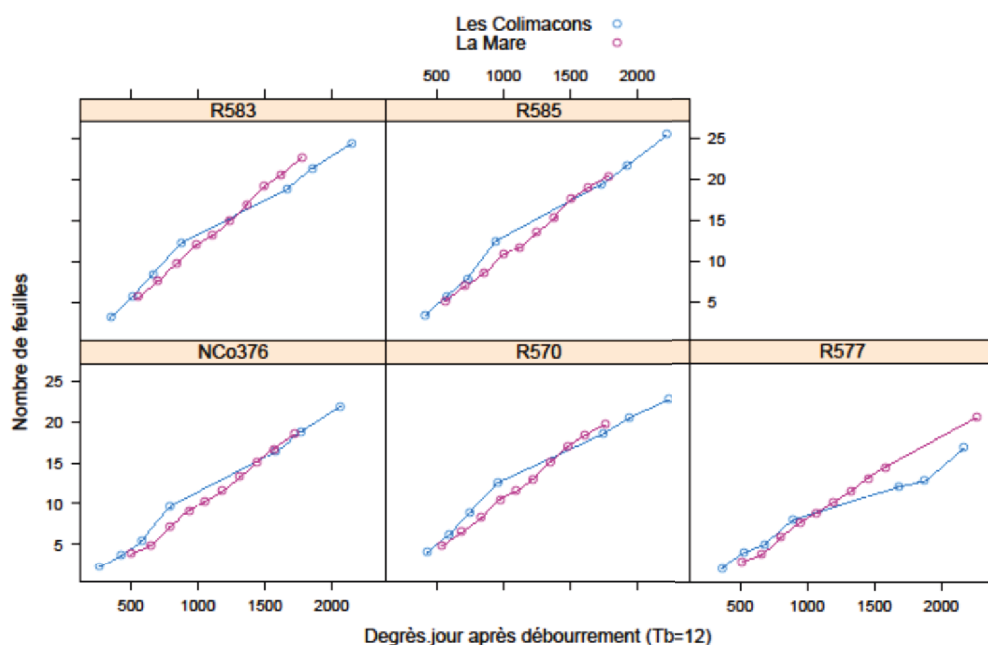


Figure 61. Nombre de feuille par tige primaire en fonction du jour après débournement pour 5 variétés sur deux sites.

A



B



Sur deux sites : La Mare (50 m) et Les Colimaçons (790 m) pour 5 variétés. A, en jour; B, en degré.jour (Tb= 12°C)

Figure 62. Nombre de feuilles émises après débourrement

La projection des processus non plus en jour mais en somme de degré.jour illustre (Figure 62B) la similitude des dynamiques d'apparition des feuilles pour les périodes retenues pour les Hauts et pour les Bas. **La température explique par conséquent une grande part des différences observées selon les sites.** Ces résultats corroborent ceux obtenus en Australie et en Afrique du Sud (Bonnett, 1998, Singels et al., 2005).

Les gammes limitées de rangs de feuilles utilisées ne nous permettent cependant pas de nous prononcer sur l'existence d'un subit ralentissement de la vitesse d'émission des feuilles (en temps

thermique) comme suggéré par Inman-Bamber (1991). Cet effet observé selon les variétés autour des rangs de feuilles 15 à 18 est dénommé « broken stick » (Inman-Bamber, 1994). En Afrique du Sud, il permet à Zhou et al. (2003) de caractériser différents comportements entre 4 variétés expérimentées. Ce concept de variation de la vitesse d'émission de feuilles est utilisé dans le modèle de croissance « Canegro » (Inman-Bamber, 1991) qui caractérise le phénomène à l'aide d'un modèle biphasique linéaire pour lequel sont paramétrés, par variété, la vitesse d'émission de feuilles maximum et le rang de feuilles correspondant (Singels et al., 2008). Cette modification brutale dans le rythme d'émission ne s'explique pas aisément dans la mesure où aucun changement dans le développement de la plante n'est observé mis à part l'allongement de la gaine foliaire d'une feuille à une autre, qui pourrait retarder l'apparition de la ligule (Bonnett, 1998). Pour d'autres plantes, comme le riz, cultivé à température constante, le changement existe mais n'est pas abrupte (Yin and Kropff, 1996) et une fonction puissance caractérise de façon satisfaisante ce processus d'émission de feuille dans le temps thermique. Pour le sorgho (Clerget et al., 2008), un ralentissement plus brutal du rythme d'apparition peut survenir au-delà de la 20^{ème} feuille. Il est en partie expliqué par des sensibilités des espèces à des changements du photopériodisme. Pour la canne à sucre, Bonnett (1998) constate qu'une fonction linéaire décrit le processus d'émission de feuilles de façon fidèle jusqu'au rang de feuille 30.

Le modèle d'analyse de covariance ainsi que les paramètres estimés sont présentés en Équation 5 et les paramètres estimés dans le Tableau 17. Le « décrochage » observé sur la variété R577 et dans une moindre mesure sur R583 pour les trois dernières mesures entre le site de La Mare et des Colimaçons (Figure 62B) nous amène à construire un modèle propre à chaque site.

Modèle d'analyse de la covariance

$$y_{ij} = a_i x_i + b_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec y_i le nombre moyen de feuilles émises pour la variété i à x degré.jour ($T_b = 12$) après débourrement.

ε : résidu

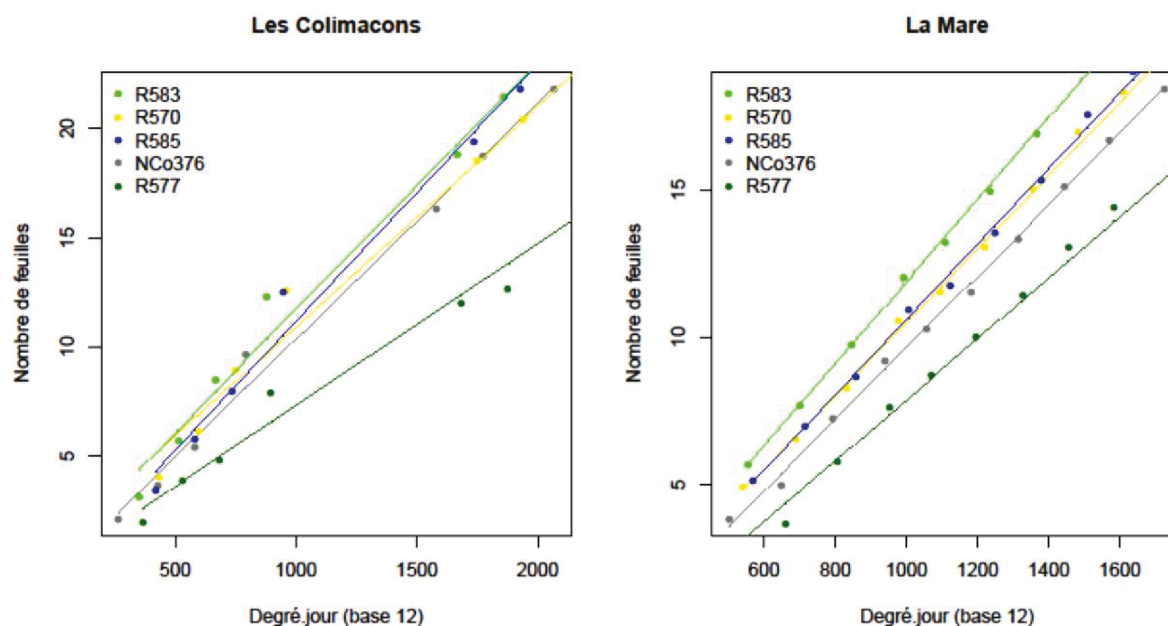
a et b = paramètres du modèle

Équation 5. Equation du modèle d'émission de feuilles

Tableau 17. Valeurs estimées du modèle d'émission de feuilles

	NCo376	R570	R577	R583	R585
Les Colimaçons ($R^2 = 0,98$)					
Vitesse du processus (a) ($\times 10^{-3}$)	10,9 ^b (0,6)	10,1 ^b (0,8)	7,4 ^a (0,8)	11,3 ^b (0,8)	11,8 ^b (0,8)
Nb de feuille à l'origine (b)	-0,52 ^{ns} (0,71)	0,84 ^{ns} (0,80)	-0,12 ^{ns} (0,76)	0,38 ^{ns} (0,76)	-0,69 ^{ns} (0,78)
La Mare ($R^2 = 0,99$)					
Vitesse du processus (a) ($\times 10^{-3}$)	12,1 ^b (0,2)	12,5 ^b (0,3)	10,4 ^a (0,3)	14,0 ^c (0,3)	12,8 ^b (0,3)
Nb de feuille à l'origine (b)	-2,53 ^{ns} (0,28)	-1,94 ^{ns} (0,29)	-2,53 ^{ns} (0,24)	-2,10 ^{ns} (0,30)	-2,26 ^{ns} (0,30)

Valeur des paramètres; pour chaque paramètre les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5% ; n.s., non significatif; écarts type (entre parenthèses).



Après le stade de débourrement sur deux sites : La Mare (50 m) et Las Colimaçons (790 m) pour 5 variétés en degré.jour ($T_b = 12^\circ\text{C}$) par site pour les 5 variétés avec leur droite respective de régression.

Figure 63. Nombre de feuilles émises

Sur les deux sites, l'analyse de covariance montre que **l'émission de feuilles est dépendante linéairement⁴³, pour les 5 variétés, de l'accumulation par jour des degrés au dessus de 12°C** (Figure 63). Les vitesses d'émission respectives (pente des droites de régression) par variété ont été comparées deux à deux. **Sur le site de la Mare, la variété R583 émet des feuilles plus rapidement que toutes les autres.** Indépendamment du site, **la variété R577 émet des feuilles moins rapidement que toutes les autres variétés.** Les ordonnées à l'origine des droites de régression ne sont pas différentes les unes des autres, cela signifie que les différences observées sont effectivement acquises lors de la phase d'émission de feuilles.

3.3.2. Surface unitaire des feuilles selon leur rang

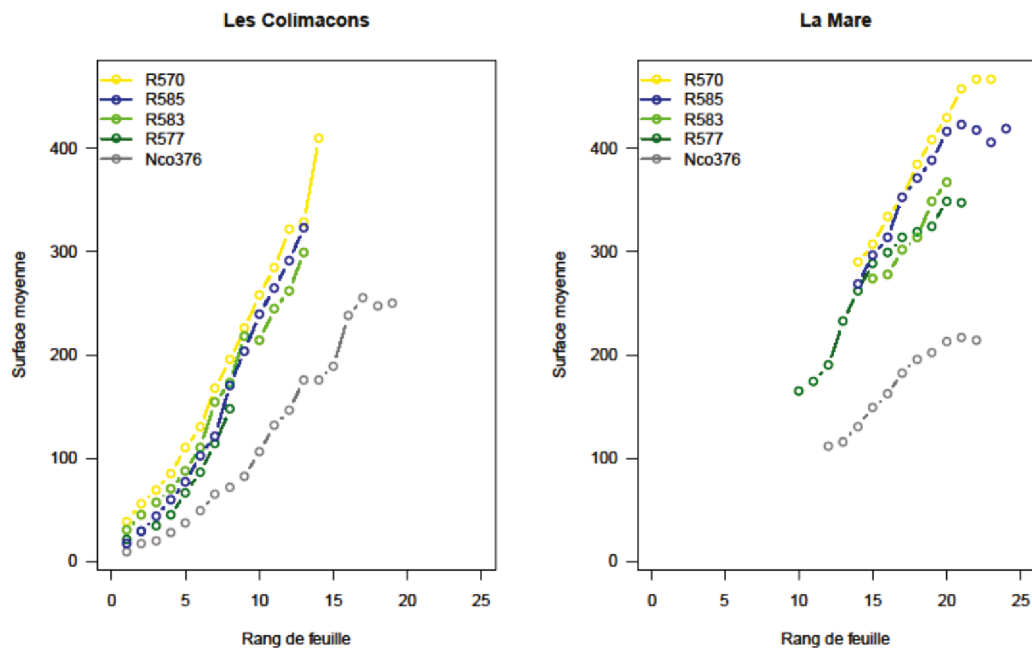
Les mesures de mensuration des feuilles (longueur et largeur) ont permis de mettre en évidence pour chaque variété et pour les deux sites l'évolution de la surface respective des feuilles ligulées en fonction de leur rang d'émission par site et par variété (Figure 64). **Il existe une corrélation forte entre le rang de la feuille sur la tige et sa surface** comme montré par Singels et al. (2005) sans toutefois montrer distinctement de stabilisation voire de réduction des surfaces autour des rangs 20 car ces derniers sont très peu représentés dans nos jeux de données. **Nos résultats montrent des différences entre variétés**, aussi observées par Singels et al. (2005). Ainsi, **la variété NCo376, dans nos conditions émet aussi des feuilles plus petites comparativement aux autres variétés⁴⁴** sur les deux sites⁴⁵. Dans nos conditions, c'est plus particulièrement la largeur des feuilles de cette variété, plus étroites qui explique cette surface réduite (résultats non présentés). Le manque de données⁴⁶ ne nous permet pas de comparer les surfaces maximales atteintes ni de mettre en évidence des différences variétales de surface des feuilles de même rang entre site.

⁴³ Paramètres statistiquement différents de 0.

⁴⁴ Comparée à la variété CP66 dans les essais décrits par Singels et al. (2005).

⁴⁵ Un test de Wald nous a permis de comparer la variété NCo376 à toutes les autres (résultats statistiques non présentés).

⁴⁶ Pour des raisons pratiques et du fait de la sénescence de tiges les mesures ultérieures à la 24^{ème} feuille aux Colimaçons et à la 19^{ème} à La Mare ou en nombre trop faible n'ont pu être exploitées pour l'analyse.



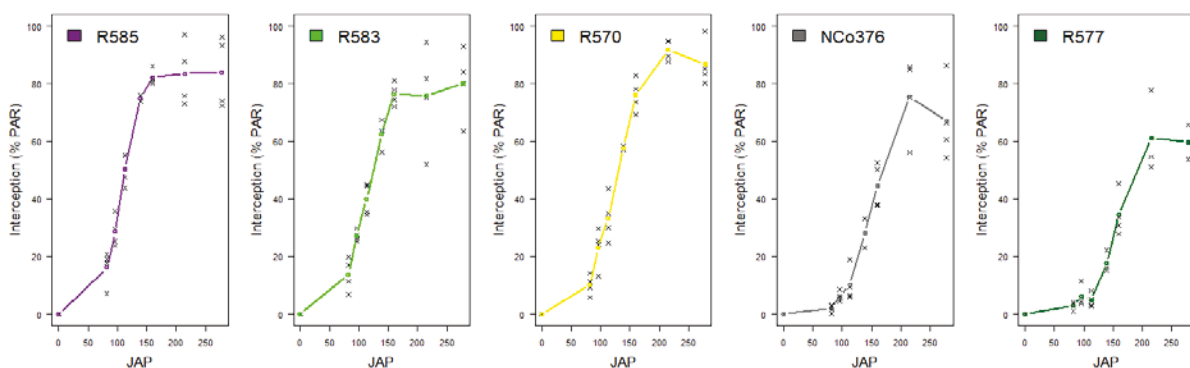
En cm² pour 5 variétés sur deux sites : Les Colimaçons (790 m) et La Mare (50 m).

Figure 64. Surface des feuilles adultes selon leur rang sur la tige

En résumé, notre expérimentation a permis de mettre en évidence un retard conséquent de l'installation foliaire sur le site des Hauts et des différences significatives entre variétés. Concernant les différences variétales, la variété NCo376 se distingue une fois encore avec une surface unitaire de feuille réduite.

3.4. Fermeture du couvert

Les mesures ont été réalisées sur les 2 sites mais seules celles de La Mare sont exploitables⁴⁷. Les données brutes par bloc (Figure 65) mettent en évidence des contrastes à la fois dans la vitesse d'installation du feuillage, dans le couvert atteint lors des dernières mesures ainsi que d'un bloc à un autre.



En fonction des jours après plantation pour 5 variétés sur le site de La Mare. Croix : valeurs moyennes par bloc, Cercles reliés par une droite : valeurs moyenne des blocs.

Figure 65. Pourcentages de l'Interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)

⁴⁷ Les mesures réalisées sur le site en altitude des Colimaçons ont été perturbées par la présence de nuages. Peu nombreuses et de mauvaise qualité, elles ne sont pas exploitées ici.

Le modèle logistique qui représente le mieux les données observées est, dans le cadre de notre étude du type cloglog. Le modèle est composé de 3 paramètres et s'écrit :

Modèle logistique de type cloglog

$$y = C * (1 - e^{(-e^{(A \times (x - B) + \log(-\log(0,5))}))})$$

y : % d'interception PAR x : Temps thermique (en degré.jour Tb= 0)

A, B,C : Les paramètres du modèle

Équation 6. Modèle logistique de type cloglog de représentation de l'interception du rayonnement (PAR) pour 5 variétés sur le site de La Mare en pourcentage par degré.jour.

Tableau 18. Valeurs estimées des paramètres du modèle de fermeture du couvert sur le site de La Mare.

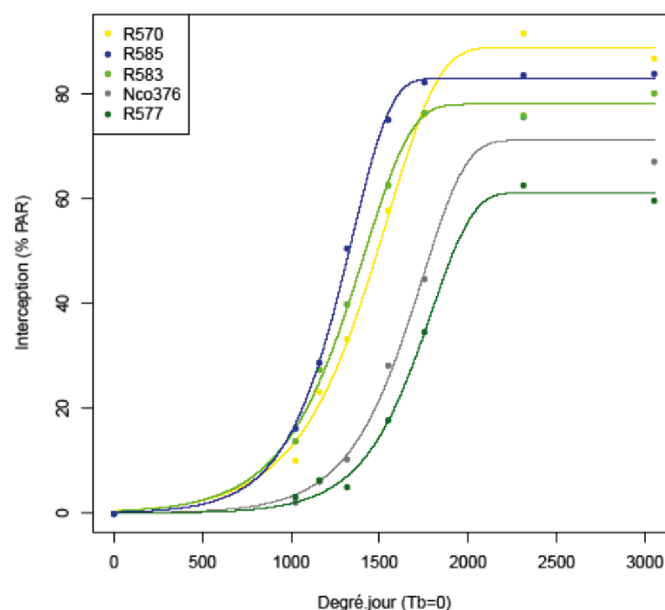
	NCo376	R570	R577	R583	R585
Vitesse maximum (A) 10^{-3}	4,1 ^a (0,5)	3,4 ^a (0,2)	4,4 ^{ab} (0,4)	3,7 ^{ab} (0,3)	4,6 ^b (0,2)
Demi- fermeture (B) (degré.jour Tb=0 - JAP)	1656 ^d (24)	1438 ^c (17)	1713 ^d (17)	1316 ^b (15)	1265 ^a (8)
Interception maximum (%)	71 ^b (2)	89 ^e (2)	61 ^a (1)	78 ^c (1)	83 ^d (1)

Valeur des paramètres pour 5 variétés; pour chaque paramètre les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5% ; écarts type (entre parenthèses). JAP, Jour après plantation.

Les paramètres choisis illustrent de façon satisfaisante les différences variétales. Les paramètres et leurs incertitudes respectives par variété montrent (Tableau 18) qu'il y a un **effet variétal significatif sur chacun des paramètres**.

Le modèle obtenu est représenté vis à vis des valeurs observées (Figure 66). **La variété R585 possède un feuillage qui se développe plus vite que les variétés Nco376 et R570.** Le temps pour atteindre la demi-fermeture du couvert est un bon indicateur, il permet de discriminer trois variétés plus rapides qui se distinguent les unes des autres dans l'ordre suivant : R585, R583 puis R570. Ce trio est plus rapides que les variétés Nco376 et R577. A la dernière date de mesure sur le site de La Mare, les variétés ont toutes des taux de fermeture significativement différents les unes des autres. L'ordre de classement est : R577, NCo376, R583, R585 et R570.

En résumé, sur un site, les mesures intégratives de celles réalisées sur les tiges et les feuilles ont pu être exploitées. Une équation permet de modéliser le processus de fermeture du couvert et de comparer les variétés entre elles. Les paramètres utilisés sont peu nombreux : vitesse de processus, temps pour atteindre un stade (demi-fermeture) et taux d'interception maximum atteint à une date. Ces paramètres sont d'ordre biophysiques et ont par conséquent l'intérêt de pouvoir donner lieu à des interprétations biologiques. Les résultats confirment les meilleures aptitudes d'installation du couvert végétal des variétés R585, R583 et R570 comparativement aux variétés Nco376 et R577.



En fonction des degré-jours après plantation pour 5 variétés sur le site de La Mare, Points : valeurs moyennes des blocs observées ; Lignes : valeurs moyennes des blocs estimées.

Figure 66. Pourcentages de l'Interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR)

4. Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus à partir des données collectées sur les essais réalisés sur les 5 variétés étudiées sur les deux sites ont fait l'objet de tests ou de classements⁴⁸ qui sont récapitulés de façon synthétique (Tableau 19). Cette présentation utilise un dégradé de teintes grisées par processus ou critères de fonctionnement et par site. Le résultat le plus favorable à la fermeture du couvert est plus clair, le résultat le moins favorable est le plus foncé. Les performances d'une variété selon les processus ou critères de fonctionnement peuvent ainsi être comparées visuellement, tout comme les variétés entre elles sur un même site.

Tout d'abord, pour l'ensemble des processus ou critères, les conditions des Hauts aux Colimaçons pénalisent l'installation du couvert végétal. L'émission de tiges est plus tardive et plus lente, le temps pour atteindre le niveau de densité de tiges récoltées est de 3 à 4 fois plus long. La croissance des tiges est elle aussi plus tardive et ralentie tout comme l'émission des feuilles sur le site en altitude. C'est bien la combinaison de ces effets dont certains sont directement liés à la température (émission de feuilles) qui représentent un frein à l'implantation de la plante dans les conditions d'altitude.

Outre l'effet dû au site, l'analyse des résultats montre qu'il existe un effet variétal sur plusieurs processus : hauteur des tiges, émission des feuilles, surface des feuilles (Tableau 19). Aussi, les variétés peuvent avoir des caractéristiques contrastées selon le processus ou critère considéré correspondant à des stratégies de colonisation de l'espace différentes. La variété NCo376 possède par exemple la surface de feuille la plus petite relativement à toutes les autres variétés, elle possède par contre le nombre de tige le plus important sur le site de La Mare. Cette variété n'a pas la vitesse d'émission la plus lente de feuilles sur les deux sites. Ce résultat alimente notre questionnement sur l'interdépendance des processus. La variété NCo376 semble, vis-à-vis de la variété R577

⁴⁸ Les tests sont basés sur des analyses statistiques, les classements illustrent l'ordre observé.

« compenser » une surface réduite de ses feuilles par une émission plus fréquente et en plus grand nombre de ces tiges et de ces feuilles.

Tableau 19. Récapitulatif des tests et classements sur les processus ou critères phénologiques de 5 variétés.

Chambres climatiques		R577	NCo376	R570	R585	R583						
Débourrement - levée (JAP)	modèle	Temp seuil(Tb)	a	b b		a						
		½ levé (Θ50)	c	b	a	b						
		Etalement (Θ25-75)	b	a a a								
	Champ		La Mare			Les Colimaçons						
		R577	NCo376	R570	R585	R583	R577	NCo376	R570	R585	R583	
Taux (%)		72,5	97,5	92,5	95	90	35	35	65	72,5	52,5	
Durée ½ levée (jour)		15	16	13	11	12	33	52	23	25	36	
Classement		4	5	3	1	2	3	5	1	2	4	
pic (JAD)		300 à 330 000 tiges/ha en 150 jours					200 000 tiges/ha entre 200 et 250 jours					
Emission de tiges (moyenne)	Modèle	Latence degré.jour tb=16	3	2	1	1	1	3	2	2	2	1
		Classement (JAD)										
		Vitesse (JAD)	ns	ns	ns	ns	ns					
		½ pic (JAD)	b	b	a	a	a					
Plateau		a	c	b	b	c						
Temps pour atteindre la densité de tiges récoltées		classement	5	4	3	2	1	3 à 4 fois plus lent				
			5	4	3	2	1	5	4	2	2	1
Hauteur tiges	Comparaisons par date		5 dates sur 8 (dont 4 dernières)					à 341 JAP				
	Modèle	Vitesse (JAD)	a	a	b	c	c	a	a	b	b	ab
		hauteur à l'origine (JAD)	ns	ns	ns	ns	ns					
			a	ab	ab	c	bc					
Emission de feuilles (JAD)	150 jours		5 à 10 feuilles de moins									
	modèle	vitesse	a	b	b	b	c	a	b	b	b	b
		Ordonnée à l'origine	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Surface feuille/rang		b	a	b	b	b	b	a	b	b	b	
Fermeture du couvert (JAP)	modèle	vitesse	ab	a	a	b	ab					
		½ fermeture	d	d	c	a	b					
		plateau	a	b	e	d	c					

Pour les analyses ayant données lieu à des classements les chiffres sont utilisés, pour celles correspondant à des tests statistiques des lettres sont utilisées. JAP, Jour après plantation ; JAD, Jour après débourrement. Deux variétés d'un même site qui ont la même lettre sont semblables.

Des teintes ont été affectées, du plus clair pour les comportements favorables à l'installation du couvert au plus foncé.

Sur les deux sites, l'ordre des variétés reste sensiblement le même selon les parcours de développement étudiés. Par exemple, le trio des variétés R583, R585 et R570 s'illustrent le plus souvent par de meilleures aptitudes qui favorisent l'installation du couvert végétale sur les sites des Hauts et des Bas.

Cette tendance ne doit pas masquer le fait que pour certains processus ou critère, nous observons, dans nos conditions d'expérimentation, une différence relative d'adaptation des variétés selon le site, c'est-à-dire selon l'environnement. Le classement des variétés par aptitude n'est effectivement pas strictement identique pour tous les environnements.

Compte tenu des données disponibles, l'exemple qui illustre un classement différent selon l'environnement est celui de la variété R583 pour laquelle le débourrement est plus rapide relativement aux autres variétés à La Mare qu'aux Colimaçons. Le classement de la variété R583 en 4^{ème} position aux Colimaçons (Tableau 19) correspond à une durée nécessaire à 50 % de la levée des boutures ayant levées plus longue de 3 jours sur 36 jours par rapport celle de la variété R577 classée en 3^{ème} position. Sur le site de la Mare, la variété R583 se classe par contre en 2^{ème} position avec 12 jours cette fois-ci devant la variété R577 avec 13 jours en 4^{ème} position. Ce changement dans l'ordre de classement observé quoique subtil, caractérise le principe d'une interaction génotype x environnement. Dans ce cas de figure, nous nous serions attendus à une interaction reflétant une meilleure adaptation de la variété R583 dans les Hauts puisque cette variété, au vu des résultats obtenus pour les différents processus étudiés, y compris en chambre climatique, est le plus souvent la mieux adaptée. La qualité des boutures⁴⁹ aurait pu expliquer une levée moins bonne (Cf. Chap III - 5.3.3 page 113) mais dans le cas présent, les boutures des différentes variétés ont été préparées simultanément dans un même champ et sont de qualité égale par site. La qualité des boutures ne peut donc pas être responsable du faible retard relatif et observé.

Les variétés ayant levées plus rapidement que les autres comme la variété R585 à La Mare⁵⁰ ou R585 aux Colimaçons conservent leur avance durant les phases ou processus ultérieurs et l'amplifient le cas échéant (R583). Dans nos conditions d'expérimentation toujours, les variétés pénalisées par un retard lors du processus de débourrement n'ont pas l'occasion de le compenser car elles n'ont pas de meilleures aptitudes lors des processus ultérieurs. Il est probable - mais non démontré⁵¹ - que dans nos conditions de culture dans les Hauts, les avantages acquis par une culture sur une autre (une variété, par exemple) au stade de pleine couverture puissent être conservés jusqu'à la récolte.

Le processus de fermeture du couvert par mesure de l'interception du rayonnement photosynthétique actif (PAR), se voulait intégrateur de l'ensemble des processus étudiés. Les données exploitables sur un seul site (La Mare) ont permis de bâtir un modèle qui simule de façon fidèle le processus à l'aide 3 paramètres ayant un sens biologique. Le modèle montre des différences de comportement entre variétés, il reflète dans notre étude sur un site l'adaptation variétale. Sans représenter les adaptations aux processus séparément, le modèle combine l'ensemble des processus liés à la mise en place du système foliaire étudiés ou non. Il reflète fidèlement la prédominance du trio de variétés R570, R583 et R585. Une telle approche est pertinente pour appréhender une mise en place du couvert végétal mais ne permet pas d'en expliquer les composantes telles que la surfaces

⁴⁹ Cette qualité avait été invoquée comme une des possibles explications au décalage entre la dynamique de levée observée sur le terrain et celle du modèle établi à partir d'observations en chambre climatiques.

⁵⁰ Ces deux variétés ont démontrées des aptitudes à un débourrement précoce, rapide et en nombre en chambres climatiques (Cf. 5.2.2 page 108).

⁵¹ Du fait des contraintes expérimentales.

de feuilles ou le nombre de tiges qui sont pourtant, nous l'avons confirmés, sont caractéristiques selon les variétés.

En résumé, nos expérimentations, bien qu'ayant une puissance de test réduite pour les données issues du site des Colimaçons, ont permis de mettre en évidence des différences dans les dynamiques d'émission et de croissance des tiges, de mise en place de la surface foliaire à la fois entre variétés mais aussi entre deux sites situés dans les Hauts et dans les Bas. La température joue un rôle majeur. De plus nous avons montrés que selon le caractère étudié le classement des performances par variétés n'est pas scrupuleusement identique d'un site à l'autre.

Résumé Chapitre IV

Mise en place de la surface foliaire

Etat de l'art et objectifs

Lorsque la bouture (ou la souche) est correctement alimentée en eau, la phase de levée de la canne à sucre dépend principalement de la température (Cf. Chap III). L'étape suivante est la mise en place des feuilles, qui peut être décomposée en émission de feuilles, émission de talles, allongement de tige. Chez les graminées, le bourgeon axillaire de chaque feuille peut se développer et donner une talle, ce qui conduit à un rythme d'apparition de talles lié à celui des feuilles. La surface foliaire présente à chaque moment de l'installation du couvert dépendant de la combinaison de ces 3 processus et de la surface individuelle de chaque feuille. L'émission de feuilles, le tallage et la surface des feuilles dépendent largement de la température, mais aussi d'autres facteurs : trophiques (rayonnement), hydriques ou minéraux.

Qu'en est-il de l'effet de la température dans ces phases, ce qui peut se décliner en plusieurs questions :

- En quoi l'apparition des feuilles et des tiges et leurs croissances sont-elles dépendantes de la température ?
- Les lois d'action mises en évidence pour la levée sont-elles semblables pour les stades ultérieurs, peuvent-elles être utilisées pour les émissions de feuilles, de tiges ? Les tailles finales de feuilles sont-elles dépendantes de la température ?
- Les variétés plus rapides lors du débourrement le sont-elles aussi lors des processus ultérieurs ?
- En résulte-t-il une conservation totale ou partielle de l'avance acquise pendant la levée ?

Méthode

Les expérimentations concernant cette phase de l'installation du couvert ont été réalisées au champ, car le rayonnement souvent limitant en chambre devient prépondérant à cette période. Les faibles rayonnements peuvent modifier la forme finale de la plante, hauteur totale, nombre de talles, forme (et surface) des feuilles.

Dans la mesure du possible, nos conditions d'expérimentation limitent les contraintes hydrique et azotée, la contrainte trophique est celle subie par une culture (concurrence entre plantes), puisque les plantes ne sont pas cultivées comme des plantes isolées.

De même que pour la levée, les températures sont relevées à proximité des organes concernés par les processus, durant la période pendant laquelle se déroule le processus.

La phase d'installation (de la levée à la fermeture du couvert, soit environ 75 % d'interception) est suivie pour 5 variétés dans 2 milieux (plaine et altitude). Les rythmes d'émission de feuilles sont observés chaque semaine, ainsi que ceux des talles, les dimensions finales de feuilles sont mesurées en fin d'expérimentation

Les paramètres des courbes d'effets de la température sont estimés pour l'émission des feuilles, de tiges (talles), la hauteur de tige et la surface individuelle des feuilles.

Les nombres de feuilles sont estimés par des régressions linéaires en fonction de la température cumulée au-dessus d'un seuil moyen, les nombres de tiges par une logistique en fonction du temps (un seul lieu), l'allongement de la tige par une exponentielle, en fonction du temps également et l'interception par une loi logistique (loglog) en fonction de la température cumulée, sans seuil.

De plus des mesures d'interception sont faites tout au long de l'installation du couvert. Seules les mesures de la station de basse altitude sont utilisables, les problèmes d'ennuagement ayant perturbé les mesures faites dans la station d'altitude.

Résumé Chapitre IV

Mise en place de la surface foliaire (suite)

Principaux résultats

Feuilles : nombre

Du point de vue du nombre de feuilles, les vitesses d'apparition –à conditions de milieu égales- sont très différentes entre variétés, la variété R577 étant plus affectée, particulièrement aux Colimaçons. La différence de comportement de R577 est encore plus nette dans la représentation en fonction de la température en conditions froides, ce qui laisse supposer que les températures subies sont plus proches du seuil de fonctionnement de R577 que de celui des autres variétés. La température –seuil constitue un exemple d'explication de l'origine d'interaction génotype-environnement.

Feuilles : taille finale selon le rang

Pour les dimensions des feuilles selon leur rang, c'est la variété NCo376 qui a les plus petites tailles, cela devrait conduire à une surface foliaire plus faible pour NCo376 que pour les autres variétés, à une date donnée. Comme elle émet un nombre de feuilles plus grand, il est possible qu'elle atteigne des proportions d'interception aussi fortes que les autres variétés, mais plus tard seulement.

Talles, tiges usinables

Le nombre de tiges émises à une date donnée est peu différent entre génotypes, sauf pour R577, qui marque un fort retard, particulièrement aux Colimaçons, ce qui est encore une interaction génotype-environnement (et peut provenir, comme supposé pour les feuilles, de la proximité des seuils de fonctionnement, impliquant une forte sensibilité aux températures basses).

Le nombre maximum de tiges est atteint beaucoup plus tôt en temps à la Mare qu'aux Colimaçons. Ces nombres maximum sont peu différents entre variétés, un peu plus entre lieux, sauf pour R577 encore, qui émet (très) peu de talles, surtout en altitude, ce qui peut encore être relié à son émission de feuilles lente.

L'arrêt du tallage est un peu plus précoce en nombre de tiges aux Colimaçons qu'à la Mare : on peut se demander ce qui provoque l'arrêt, certainement pas l'arrivée à un indice foliaire saturant (encore faible à cette période), sans doute l'apparition de stress trophique (rayonnement faible ou occurrence de températures basses ?) ou minéral (manque d'azote disponible ou absorbé).

La régression des tiges est très forte et rapide à la Mare.

Il n'est pas possible de dire, vu les incertitudes, si les nombres de tiges (usinables) sont différents entre les deux lieux.

Interception du rayonnement

Les mesures d'interception à la Mare confirment l'observation des tailles de feuilles: R577 et NCo376 ont des évolutions d'interception presque semblables (avec une légère avance pour NCo376), R577 parce que son rythme d'apparition de feuilles est plus faible et NCo376 parce qu'elles sont plus petites. Pour les 3 autres variétés, les courbes sont peu différentes (léger retard de R 570 sur R 583 et R 585).

Longueur des tiges

Des différences significatives existent entre les hauteurs de tiges entre sites et entre variétés. La croissance des tiges débute plus tardivement et est plus lente sur le site des Colimaçons que celui de la Mare. Les différences de hauteur de tiges entre variétés proviennent à La Mare d'un retard dans le démarrage de la croissance (vitesse non différentes) tandis que sur les Colimaçons l'écart entre variétés se creuse au fil du temps.

Conclusion

Nos expérimentations montrent des différences dans les dynamiques d'émission et de croissance des tiges, de mise en place de la surface foliaire à la fois entre deux sites situés dans les Hauts et dans les Bas et entre variétés. La température joue un rôle majeur.

Cependant, toutes les étapes de l'installation de la surface foliaire n'ont pas pu être bien caractérisées dans les 2 milieux contrastés choisis, qu'il s'agisse des tailles finales de feuilles, des nombres de talles et de leur régression ou de l'évolution de l'interception de chaque couvert dans chaque milieu.

Chapitre V : Discussion générale et perspectives

Le travail consistait à valider l'importance de l'implantation de la culture de la canne à sucre en cycle de plantation comme étant une phase essentielle pour la culture. Il s'agissait de montrer plus particulièrement que cette étape est très sensible aux effets de températures plus fraîches qui deviennent une contrainte majeure lors de certaines extensions de la culture sur de nouveaux terrains sous contrainte.

L'originalité du travail a été tout d'abord le choix de ce thème peu étudié parce que peu pertinent jusqu'alors et ensuite la démonstration d'une part de l'effet de la température sur les processus en jeu principalement lors de la levée et, d'autre part, de la possible adaptation variétale aux contraintes thermiques rendu possible grâce à la présence à La Réunion de variétés sélectionnées pour les Hauts. Enfin, l'intérêt de ce travail réside dans la valorisation des résultats obtenus en chambres climatiques par une représentation cartographique de l'adaptation géographique des variétés à des zones de culture.

L'objectif était plus particulièrement d'évaluer l'influence des températures fraîches d'altitudes tropicales sur l'implantation de la culture de la canne à sucre. La finalité était d'exploiter les résultats phénologiques pour évaluer le potentiel de nouvelles zones de culture dans les Hauts de La Réunion. La démarche consistait à sélectionner un matériel végétal sain et homogénéisé, permettant (i) de mettre en évidence, par des tests en chambres climatiques l'effet des basses températures particulièrement pénalisantes lors du débourrement mais aussi (ii) de quantifier l'adaptation variétale à l'aide d'un modèle de représentation de la levée. Au final, un exemple de valorisation des résultats de levée par projection géographique répond à la question d'adaptation géographique des variétés et ouvre des perspectives multiples de traitement des informations obtenues.

1. Résultats et limites

1.1. Qualité des boutures et débourrement

Le travail effectué sur la qualité de la bouture montre tout d'abord l'importance de ce paramètre « qualité sanitaire » pour éviter des attaques d'insectes. Les variétés sensibles peuvent subir des dégâts important qui réduisent la capacité de levée. Dans le cadre d'expérimentations sur les capacités de levée intrinsèque aux variétés, il est primordial d'identifier toute cause de non levée (insectes ou autre sources de dégâts physiques) qui pourraient fausser l'interprétation des résultats.

Notre approche par l'étude de portions de tiges a permis ensuite de mettre en évidence l'irrégularité de levée (en taux et en durée) des extrémités de tiges (4 derniers bourgeons du haut et du bas).

L'intérêt est croissant pour le sujet de la capacité de levée des bourgeons en fonction de leur position d'origine le long de la tige-mère (topophysie). A La Réunion pour des besoins de remplacement de plants (Caro canne, Novembre 2008) mais surtout au Brésil en condition de plantation (Guimarães de Andrade Landell et al., 2012), l'utilisation de boutures d'un seul bourgeon est à l'étude. Dans un souci d'économie de matériel végétal, la méthode de plantation en boutures traitées Plene® (Martinho et al., 2010) ou les projets en plantation de boutures prélevées (démonstration au champ lors dernier congrès ISSCT juin 2013) tendent à valoriser la bouture pour sa valeur productive (en sucre ou éthanol) ou bien sa valeur reproductive.

L'étude de la topophysie a ainsi deux intérêts :

- Connaître les capacités propres à une variété en écartant tout impact parasite qui empêcherait la variété d'exprimer ses capacités à lever,
- fournir des règles de décision aux praticiens de la plantation qui souhaitent donner au matériel végétal sa valeur optimale.

Une étude sur les teneurs en hormones antagonistes, auxines et cytokinines, dans les bourgeons selon leur position d'origine sur la tige ou selon les variétés serait nécessaire pour confirmer les hypothèses élaborées. Elle aurait pour intérêt de lever un manque de connaissance encore actuel sur le sujet.

Le développement du genre *Myscanthus* une graminée d'un genre voisin de la canne à sucre toutes deux appartenant au « Complexe saccharum » (Pouzet, 2011) amène, pour des besoins récents de multiplication par voie végétative à partir de bourgeons, aux mêmes questions de capacité de levée en fonction de la position du bourgeon le long de la tige-mère. Une récente étude conclue que pour cette plante ce sont les 4 bourgeons du bas de tige qui possèdent la meilleure capacité de levée (Boersma and Heaton, 2012) ce qui lève de nouvelles questions scientifiques et renforce l'intérêt d'un complément d'étude hormonale.

1.2. Débourrement

Le résultat majeur de cette étude est qu'il existe un effet de la température sur le débourrement, cet effet est différent selon les variétés et d'autant plus marqué que les températures sont fraîches.

Les essais à partir de boutures sélectionnées hors impact parasite (par exemple une sensibilité phytopathologique) ou de dominance apicale ont permis d'atteindre des taux maximum de débourrement très élevés. Basés sur des températures maîtrisées, relevées à proximité de la source du processus ils ont permis de construire un modèle qui montre les qualités intrinsèques de certaines variétés.

La validation en condition réelle, bien que satisfaisante montre des limites dues (i) au principe même de la linéarité de l'action de la température sur une gamme restreinte, (ii) à d'éventuels problèmes de pratiques (dessèchement des boutures plantées - non démontré) ainsi que sur la qualité des boutures d'un seul bourgeon plantées à la verticale.

L'hypothèse de linéarité retenue pour cette étude pèse lourd. Lorsque les températures prises pour référence n'appartiennent pas à la gamme dans laquelle la température a un effet linéaire sur le processus, ce dernier est mal représenté. L'utilisation de courbes en cloche, ainsi qu'une prise en compte différente des températures de la journée ou même des températures horaires constituent des pistes qui valorisent plus fidèlement l'influence des moments durant lesquels la température est en bordure ou hors de la gamme de linéarité ; ces pistes n'ont pas été développées dans cette étude.

Il existe des pistes pour améliorer la prédiction du modèle et plus particulièrement rapprocher les données prédites par ce nouveau modèle avec celles obtenues au champ. Parmi elles : travailler dans une gamme de 15°C à 19°C à proximité des températures limites basses de cette étude pour affiner

nos connaissances sur la gamme de non linéarité de l'effet de la température (Liu et al., 1998), adopter un paramètre de mortalité, et enfin utiliser d'une population de boutures plus nombreuse.

D'ores et déjà, cette méthode de sélection de variétés plus résistantes au froid est valorisable par eRcane⁵² pour sélectionner parmi les élites des variétés de chacune des 6 stations qui seront testées au champ sur la station d'altitude (Vue Belle II à 1000 m), cette fois sur l'ensemble des cycles de plantation et de repousses.

L'originalité des résultats obtenus provient de la présence de variétés aux comportements contrastés dont certaines adaptées aux Hauts de La Réunion comme la variété R583. Cette dernière a fait l'objet d'un travail de sélection qui a mis en valeur des qualités de vigueur dès le débourrement qui la distingue des autres variétés. Dans un travail récent, Parent et Tardieu (2012) relatent pourtant une uniformité des comportements variétaux. Ils se basent sur l'utilisation de données issues de la littérature (Campbell et al., 1998, Inman-Bamber, 1994, Mongelard and Mimura, 1972) faisant référence à des variétés anciennes (Q117, Q138, NCo376, N12 et H59.3775). La variété R583, mais aussi les variétés récentes en sélection avancée sur la station de Vue Belle II possèdent parmi leurs parents le clone hawaïen H 72.8597⁵³. Ce clone qui n'est pas planté commercialement et qui est utilisé dans de nombreux croisements actuels pourrait être à l'origine d'un apport génétique qui se traduirait par une qualité d'adaptation à basse température, avec une levée précoce, rapide, abondante et homogène (montré pour R583). Il semble pertinent de vérifier les capacités de débourrement de ce clone hawaïen ainsi que de sa descendance. Aussi les méthodes d'expérimentation et le modèle obtenu pourrait servir dans les travaux du projet Délicas (Cirad UMR PVBMT) qui visent à associer génotypage et phénotypage (Nibouche S. et al., 2010).

1.3. Autres processus post débourrement

Il existe un effet de la température sur les processus ultérieurs au débourrement-levée. Les développements des organes diffèrent selon les sites et selon les variétés. Dans notre étude, certaines variétés ayant levé plus rapidement que les autres conservent non seulement leur avance dans la course à la fermeture du couvert végétal mais cette avance peut éventuellement s'amplifier. Notre travail confirme l'intérêt de se restreindre à l'acquisition de données sur la période durant laquelle se déroule le processus. Nos résultats montrent qu'il existe, dans les conditions d'expérimentation :

- un effet Génotype
- un effet environnement
- une interaction génotype x environnement⁵⁴.

La conservation du classement observé dans nos conditions confirme l'importance, dans nos travaux, de la phase de débourrement-levée pour des cannes à sucre plantées dans un milieu contraint par les basses températures. Ces résultats sont d'ailleurs extrapolables aux cycles d'implantation en repousse en tenant compte de la population plus grande de bourgeons. Ainsi, l'adaptation de certaines variétés dans les Hauts de La Réunion est bien liée à la capacité de ces

⁵² Cette technique a été transférée au cours de tests en chambre sur de nouvelles variétés en 2013.

⁵³ H 72.8597 (backcross 1) de parents H50.4509 et H65.8425 (sources eRcane L. Barau)

⁵⁴ Légère et observable pour certains sites et processus sur certaines variétés.

variétés à mieux valoriser les températures plus fraîches au moins dès le premier processus de débourrement impliqué dans l'installation de la plante. Si les vitesses de développement lors des processus ultérieurs ne sont pas, pour ces variétés, toujours strictement les meilleures, elles restent bien classées dans la course à la fermeture du couvert végétal.

La puissance des analyses statistiques est parfois limitée principalement par manque d'effectif. C'est le cas sur le site des Colimaçons où la grande variabilité des données selon les blocs ne peut être expliquée. Sur ce site, la différence de qualité de préparation de terrain avant plantation, bien que ne montrant pas de différence sur le plan de l'analyse chimique, peut masquer des différences de sol (structure - contact entre les boutures et la terre humide) qui ont pu engendrer des développements différents, décalées selon les plantes d'une même variété. N'ayant pas pu comparer les performances entre sites il est impossible de conclure sur les valeurs éventuellement communes des températures seuils et de l'effet de la température en général pour chacun des processus étudiés après la phase de débourrement-levée.

Les levées retardées entraînent un fonctionnement ralenti de la plante et s'amplifie au cours des processus qui procurent alors des mesures perturbées et donc les données entachées d'une trop grande variabilité. Il existe plusieurs pistes dans le protocole de mise en place des pieds à étudier, qui permettraient de ne considérer que les processus ultérieurs à la levée : (i) La sélection de pieds viables parmi les levées les plus homogènes et rapides, (ii) l'utilisation de pieds prélevés et transplantés ou de boutures classiques à 3 bourgeons plantées à l'horizontal.

2. Possibles valorisation géographique des résultats

Pour une valorisation et utilisation concrète de nos résultats, nous avons souhaité établir des cartes de potentiel de production qui répondent à notre questionnement initial : Jusqu'où peut-on planter les variétés adaptées aux températures basses et quand ?

Durant les dernières années, les cannes à sucre se sont implantées à La Réunion sur des terrains en altitude (Figure 18 page 40). De nouvelles variétés mieux adaptées existent, et nous les avons étudiées. Ainsi peut-on utiliser les résultats de nos connaissances pour répondre à cette question pratique qui est essentielle pour les acteurs de la filière canne à sucre à La Réunion?

2.1. Détermination de zone potentielle de culture

Nous proposons dans cet exercice un indice phénologique pour évaluer des aires potentielles de plantation à une période donnée. Le même type de cartes existe pour estimer les risques d'accidents sur des cultures, guider des choix de variétés (durée de cycle disponible) afin d'estimer des aptitudes de production (niveau de rendement, rentabilité...), de zones d'aptitude de *Myscanthus*⁵⁵ (Clifton-Brown et al., 2011) ainsi que projeter l'impact du changement climatique sur les rendements d'espèces cultivées (Lobell et al., 2008).

2.2. Définition de critères pour délimiter des zones de culture

Pour cet exemple, nous choisissons de cartographier sur une moitié de l'île, l'impact de la variabilité de la température seuil de débourrement. Au vu des résultats obtenus au Chapitre III (Tableau 12 page 98) nous choisissons pour cet exercice deux idéotypes avec pour valeurs 11°C et 13°C de

⁵⁵ A partir de la germination (taux de 50% de graines viables devant être atteint en moins de 15 jours)

températures seuils associées à une durée stable de 100 degré.jour (au-dessus de la température seuil) pour atteindre le stade de ½ levée. Cette durée correspondant à une phase critique réputée (à dire d'expert) au-delà de laquelle la viabilité de la plante est compromise. Il est entendu que dans cette démarche, seul le facteur température est pris en compte, les autres facteurs ne constituant aucun frein à l'implantation de la culture (eau, état sanitaire de la bouture, maladie, attaque d'insectes...).

2.3. Climat

Les données de températures proviennent du réseau Cirad - Météo-France de stations météorologiques, duquel sont issues les températures journalières. Ces données seront extraites et des calculs effectués par l'intermédiaire de l'outil margouill@ accessible via le site web de l'équipe Artist (URSCA/Cirad). Le travail est effectué sur 7 stations réparties sur la Côte Ouest à partir des 10 dernières années de données (2001- 2010).

Des moyennes de températures journalières sont nécessaires pour nos calculs. Un gradient altitudinal (Chopart, 2002) est alors appliqué pour corriger les températures en fonction de l'altitude.

2.4. Zonage et période d'étude

La découpe altitudinale est réalisée en tranches de 100m d'altitude à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), restreintes à la limite supérieure de 1300 m. Une découpe en transects le long des ravines est réalisée afin de les ôter et de créer une séparation entre les zones irriguées et celles ne bénéficiant pas de l'aménagement de basculement des eaux (Lecaille, 2012). L'espace est ainsi découpé en 7 zones, chacune redécoupée en tranche de 100 m d'altitude soit 91 polygones couvrant la zone Ouest de l'île (Figure 67).

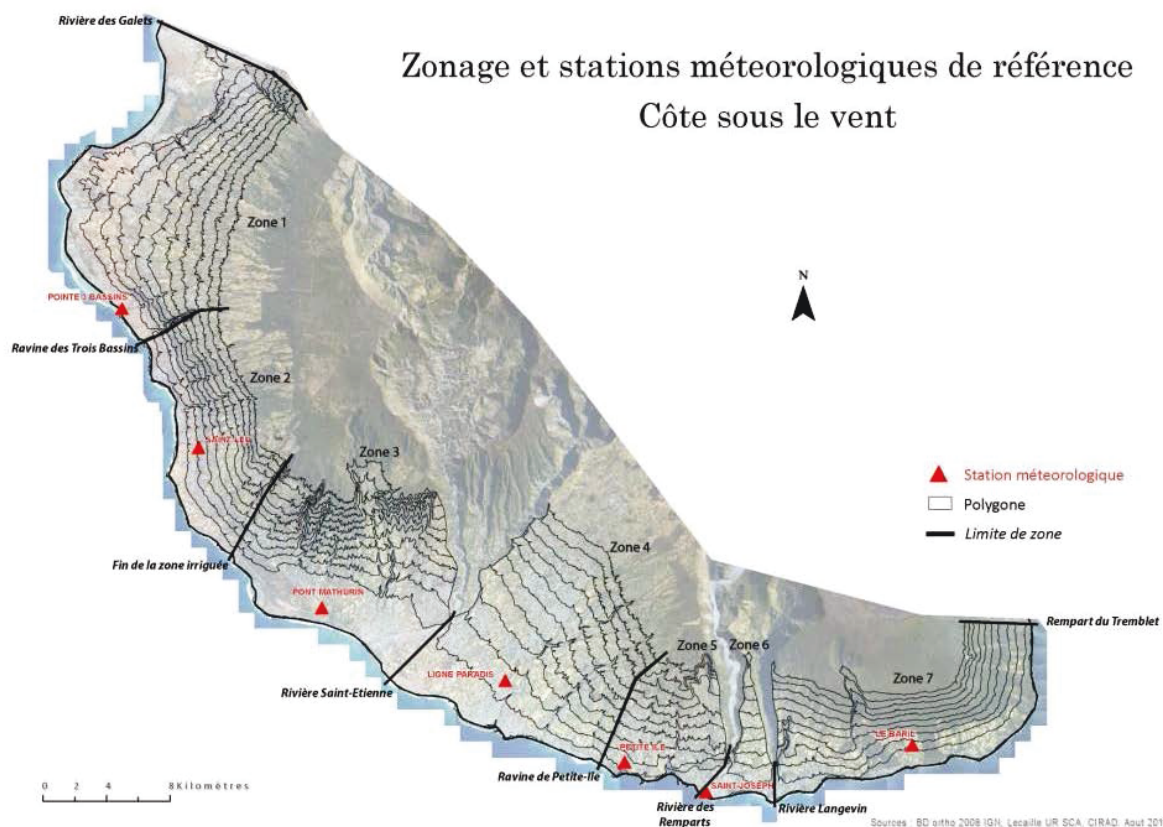


Figure 67. Zonage pour la définition de régimes thermiques en vu de la représentation d'aptitude à l'implantation des variétés nouvelles

La simulation sera effectuée pour une date de plantation fixée arbitrairement au 15 octobre juste avant la saison chaude. Ce choix s'explique par le fait que l'on cherche dans cet exercice à anticiper la récolte dès la campagne suivante, à l'issue d'un minimum de 12 à 14 mois de culture (Figure 26 page 48).

2.5. Méthode de calcul

Chaque polygone est associé à la station météorologique située en priorité dans la même zone. La requête s'effectue selon la logique suivante :

A : Recherche d'une station à l'intérieur du polygone étudié,

B : Si aucune station à l'intérieure du polygone n'est disponible, choix du polygone voisin de la même zone. Puis reprise de la méthode au (1). Itération jusqu'à trouver une station valide dans la même zone.

C : Vérification sur la station de la disponibilité des données.

D : Une fois la station sélectionnée, interpolation avec les gradients de températures.

Comme la station dont les données sont utilisées ne se trouve pas à la même altitude que les polygones étudiés, on procède à une correction des températures minimum et maximum utilisées pour obtention d'une température moyenne : $(T^{\circ}\text{min} + T^{\circ}\text{max})/2$. L'équation suivante servira à corriger les valeurs en procédant à un ajustement suivant un polynôme du 3ème degré, avec en ordonnée le gradient G (en °C par mètre) et en abscisse le numéro de mois (Chopart, 2002).

Pour la température maximum: $G = 5 \times 10^{-4} \text{ num}^3 - 1.13 \times 10^{-2} \text{ num}^2 + 6.66 \times 10^{-2} \text{ num} - 0.82$

($R^2 = 0.81$ N = 12)

Pour la température minimum : $G = 5 \times 10^{-4} \text{ num}^3 - 8.9 \times 10^{-3} \text{ num}^2 + 3.43 \times 10^{-2} \text{ num} - 0.77$

($R^2 = 0.85$ N = 12)

Avec G : gradient et num : numéro de mois

C'est la valeur du nombre de jours correspondant à la « quinquennale fraîche » (QF) qui est recherché. Cette dernière est définie comme « l'année froide » de référence avec, à la date choisie de plantation, une valeur de nombre de jour pour laquelle 80 % des données (4 cas sur 5 du nombre de jour obtenus sur l'ensemble des années de données disponibles) lui sont supérieurs. Les données de températures sont traitées par requête SQL directement dans la base de données Margouill@ disponible. On applique alors ce nombre de jours obtenu à chaque polygone.

2.6. Résultats

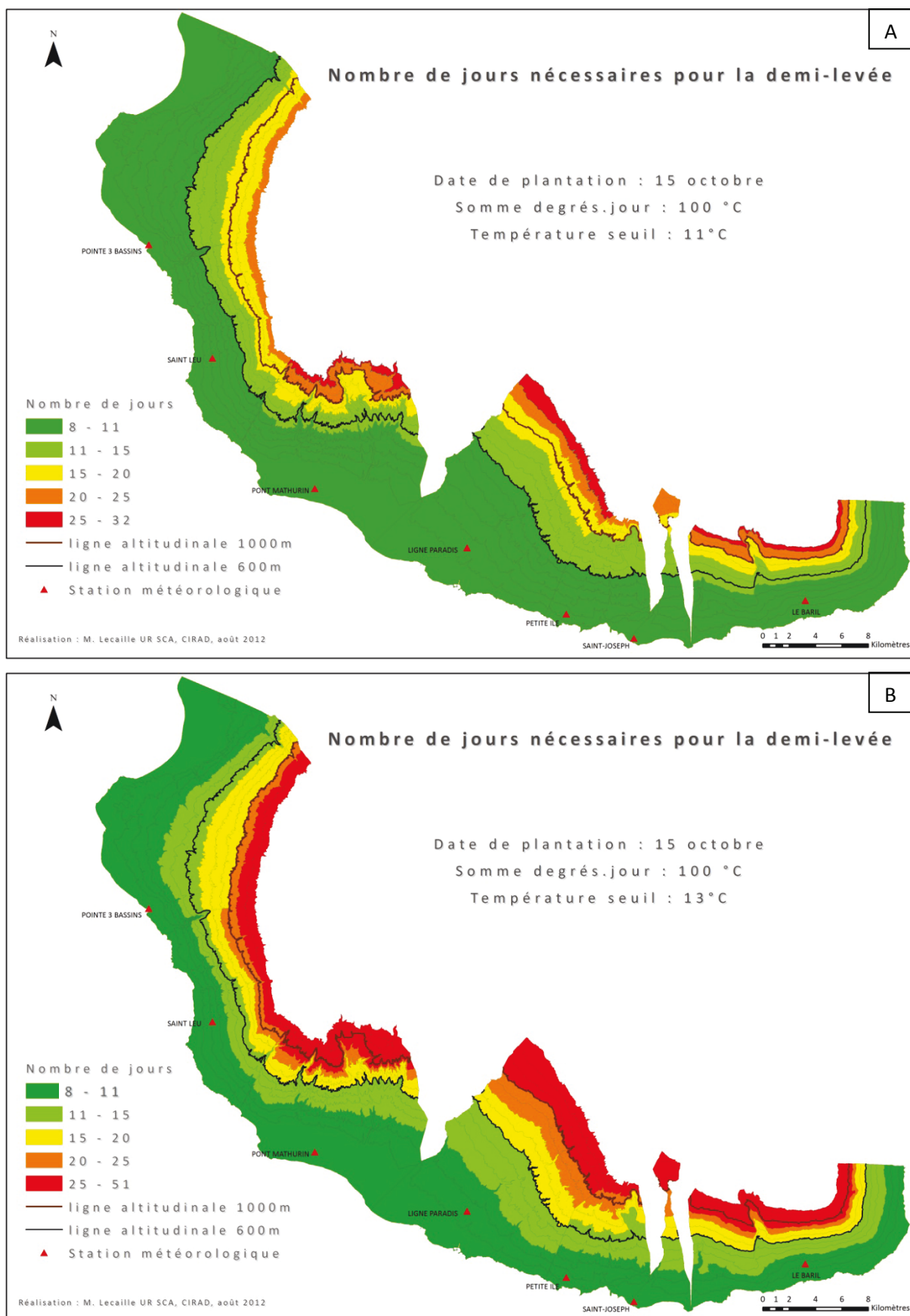


Figure 68 A et B. Nombre de jours nécessaires pour atteindre la demi-levée (50 % des boutures ayant levées) pour deux températures seuils de 11°C (A) ou 13°C (B), Plantation au 15 octobre, Années de référence : 2001-2010.

A la date du 15 octobre les nombres de jour nécessaires pour l'obtention d'une somme de degrés jour de 100° au dessus des températures seuils de 11 et 13°C sont présentés sous forme de deux cartes (Figure 68A et B).

Les simulations mettent en évidence un gradient altimétrique : alors qu'il ne faut pour l'idéotype de température seuil $T_b=13^{\circ}\text{C}$ que 9 à 11 jours dans les Bas pour atteindre la demi-levée, 15 à 20 jours sont nécessaires à une altitude de 600 à 900 m (Figure 8B). Pour l'idéotype de température seuil $T_b=11^{\circ}\text{C}$, il faut également 8 à 11 jours dans les Bas mais seulement 11 à 15 jours entre 600 et 900 m (Figure 68A et B).

Ces résultats illustrent les différences existantes entre les deux profils type de variétés, la première avec une température seuil de 11°C pourra être plantée à une altitude plus élevée à la date retenue. Pour la seconde avec une température seuil de 13°C, au delà de 600 m on passe au delà de 15 jours et au-delà de 800 m à 25 jours, ce qui compromet la réussite de la plantation.

Le modèle de débourrement-levée développé au cours de cette étude a permis d'identifier des indicateurs pour évaluer la capacité d'adaptation de différentes variétés de canne à sucre. Associés à une base de données météorologique géolocalisée, ces derniers mettent en évidence l'importance de la température seuil dans la capacité d'adaptation des variétés à différentes zones géographiques.

Dans notre cas, les cartes obtenues à l'aide du traitement réalisé illustre qu'un idéotype ayant une température seuil inférieur de 2 degrés (11°C et 13°C) étendrait ses limites d'adaptation au débourrement d'environ 300 m.

Perspective de recherche

Outre les pistes évoquées dans les chapitres précédents comme : (i) les travaux complémentaires pouvant être fait sur les capacités de débourrement avec une analyse hormonale en relation avec l'âge physiologique et la topophyse, (ii) la recherche d'une prévision plus proche des conditions au champ, deux perspectives de recherche nous semblent se dégager plus logiquement. L'une concerne la valorisation de nos résultats de débourrement-levé pour concevoir de nouveaux itinéraires techniques et l'autre consiste à poursuivre et finaliser le travail cartographique, comme outil d'étude du potentiel d'implantation des cultures dans les Hauts.

Ainsi, le type d'essais, les mesures de suivis réalisées, les méthodes d'analyse et le modèle obtenu peuvent être utiles à la mise au point de nouveaux itinéraires techniques.

De plus, la conception de nouveaux systèmes de culture basés sur une gestion plus respectueuse de l'environnement (agro-écologie) nécessite de méthodes et des outils afin d'établir du conseil. La réduction considérable des produits phytosanitaires autorisés (législation européenne) en culture de canne à sucre nous impose de réfléchir à de nouvelles stratégies de colonisation de l'espace par les plantes cultivées. La question est d'autant plus prégnante dans les zones plus fraîches, comme les Hauts de La Réunion que l'effet de la température y est majeur et la concurrence avec les mauvaises herbes toujours d'actualité malgré les progrès variétaux. L'étude de comportements des plantes pouvant être associées dans le cas de système de cultures en évolution, la modélisation de ces comportement pourrait concourir à la mise au point d'itinéraires techniques novateurs.

Si nos travaux et conclusion ont porté essentiellement sur la mise en place d'un cycle de plantation ils restent applicables lors de l'implantation en cycles de repousse.

Concernant les perspectives géographiques, l'exercice n'a été réalisé que sur le seul facteur de la température et à une seule date. Dans un premier temps, il est possible, à l'aide des données collectées et des outils mis au point de travailler sur plusieurs dates, de réaliser des cartes à fréquence constante (tous les 15 jours par exemple) tout au long de l'année pour obtenir des séquences de cartes d'aptitude à la culture évolutives dans le temps. Dans un deuxième temps, Il est opportun de croiser nos résultats avec les couches d'informations disponibles : topographie, pente, pression de l'empierrement et réserve naturelle ou en cours d'acquisition : accès aux parcelles ou friches. Il est envisageable d'intégrer des évitements de risques comme des températures trop basses (température au dessous d'un seuil (15°C) pendant plus de X heures...), de risque de sécheresse (fréquence de X jours sans pluie).

Il est aussi possible d'aller plus loin sur les autres critères. En effet l'outil réalisé a permis de montrer l'importance de la variation de la température seuil ; toutefois la somme de degré.jour nécessaire pour atteindre un stade, est elle aussi modifiable. La combinaison des deux paramètres permet de simuler une grande diversité d'idéotypes.

Nos résultats, nos méthodes obtenues à **la Réunion** peuvent être valorisés par un travail sur le potentiel de surface cultivable avec de nouvelles variétés. Une fois le doute levé sur le maintien de l'adaptabilité entre le stade de fermeture et la récolte et les rendements finaux approchés, il devient possible d'associer ces surfaces à un gain potentiel de rendement, puis d'estimer le gain de rendement final à différentes échelles imputable au changement de variété.

Compte tenu du développement **mondial** des superficies sous canne à sucre, y compris dans des zones à température plus fraîche, nos travaux pourront trouver application dans ces régions que l'on trouve en Argentine, au Mexique, en Chine et même au Maroc. A l'aide de données météorologiques et par des tests basés sur les mêmes principes que ceux présentés dans nos travaux, des études de l'adaptabilité (au moins lors des premiers stades) pourraient être réalisées par simulation. Les méthodes et modèle mises au point lors de ce travail représentent des outils d'aide à la décision, à la planification.

Références bibliographiques

- Albrechtová J. 1997.** *Development and growth of vegetative buds of Norway spruce Picea abies (L.)Karst.: the effect of acid rain.* Summary of PhD Thesis, Charles University, Prague, Czechoslovakia.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998.** Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* **56**: 300 p.
- Anonymous. 2011.** *Diseases and Pests - Seedcane production* SASRI.
- Arceneaux G. 1935.** Studies of some practical means of increasing the germination of sugarcane under Louisiana conditions In: Bull. S ed. (LA.).
- Arnold CY. 1959.** The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* **74**: 430:455.
- Bakker H. 1999.** *Sugar cane cultivation and management*, New York, NY: Kluwer Academic Plenum Publisher.
- Barnes AC. 1964.** *The sugar Cane*, New York: Interscience Publishers.
- Barrau J. 1988.** *Canna Mellis*: Croquis historique et biogéographique de la canne à sucre, *Saccharum Officinarum* L. Graminées-Andropogonées. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée* **35**: 159-173.
- Bezuidenhout CN, O'Leary GJ, Singels A, Bajic VB. 2003.** A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. *Agricultural Systems* **76**: 589-599.
- Boersma NN, Heaton EA. 2012.** Effects of temperature, illumination and node position on stem propagation of *Miscanthus × giganteus*. *GCB Bioenergy* **4**: 680-687.
- Bonhomme M, Peuch M, Ameglio T, Rageau R, Guilliot A, Decourteix M, Alves G, Sakr S, Lacoite A. 2010.** Carbohydrate uptake from xylem vessels and its distribution among stem tissues and buds in walnut (*Juglans regia* L.). *Tree Physiology* **30**: 89-102.
- Bonhomme R. 2000.** Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy* **13**: 1-10.
- Bonhomme R., Ruget F., Derieux M., Vincourt P. 1982.** Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents géotypes de maïs. *CR. Acad. Sc., Paris série III*: 393-398.
- Bonnett GD. 1998.** Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. *Aust. J. Plant Physiol.* **25**: 829-834.
- Bonnett GD, Salter B, Berding N, Hurney AP. 2005.** Environmental stimuli promoting sucker initiation in sugarcane. *Field Crops Research* **92**: 219-230.
- Bredmose N, Hansen J. 1996.** Topophysis affects the potential of axillary bud growth, fresh biomass accumulation and specific fresh weight in single-stem roses (*Rosa hybrida* L.). *Annals of Botany* **78**: 215-222.

- Brouwer C, Heibloem M. 1986.** *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs*, Rome (Italy): F.A.O.
- Brown RF, Mayer DG. 1988.** Representing Cumulative Germination. *Annals of Botany* **61**: 127-138.
- Campbell JA, Robertson MJ, Grof CPL. 1998.** Temperature effects on node appearance in sugarcane. *Functional Plant Biology* **25**: 815-818.
- Carif, Oref, Ile de la Réunion. 2013.** Diagnostic de la filière énergie renouvelables et maîtrise de l'énergie.
- Caro canne. Avril 2006.** *Maîtrise du foncier - L'enjeu majeur*. St Denis - La Réunion, Canne Progrès.
- Caro canne. Décembre 2010.** *De R570 à R585 Neuf variétés à planter*. St Denis - La Réunion, Canne Progrès.
- Caro canne. Mars 2012.** *La campagne 2010 à la loupe*. St Denis - La Réunion, Canne Progrès.
- Caro canne. Novembre 2008.** *La filière tournée vers l'avenir*. St Denis - La Réunion, Canne Progrès.
- Caro canne. Novembre 2004.** *La filière canne-sucre se projette dans l'avenir*. St Denis - La Réunion, Canne Progrès.
- Casagrande AA, Machado de Vasconcelos AC. 2010.** Fisiologia da parte aérea. In: Dinardo-Miranda LL, Machado de Vasconcelos AC, Landell MGdA eds. *Cana de açúcar*. Campinas (BR), IAC.
- Chopart JL. 2004.** Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude in situ, développement, fonctionnement. . In: synthèse. Dd ed. *Document de synthèse*, Cirad.
- Chopart JL, Marion D. 1994.** Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. *Rapp. ATP Cirad 14/92. Note Tech. Idessa n°7/94 RD. 14/92*: 28 p.
- Chopart JL, Mézino M., Le Mezo L., 2002.** Relations entre l'altitude et la température mensuelle de l'air dans l'ouest de la Réunion. In: Maurice Raesdli ed. *Congrès de la Société de technologie agricole et sucrière de Maurice*. Réduit, Ile Maurice, S.T.A.S.M.
- Clements HF. 1939.** Factors affecting the germination of sugar cane *Haw. Plant. Rec.* **44**: 117-146.
- Clements HF. 1980.** *Sugarcane Crop logging and crop control - principale and practises -*, London: Pitman Publishing Limited.
- Clements HF, Nakata S. 1965.** Minimum temperature for sugarcane germination. *Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist Puerto Rico* **12**: 554-560.

- Clerget B, Dingkuhn M, Gozé E, Rattunde HFW, Ney B. 2008.** Variability of Phyllochron, Plastochron and Rate of Increase in Height in Photoperiod-sensitive Sorghum Varieties. *Annals of Botany* **101**: 579-594.
- Clifton-Brown J, Robson P, Sanderson R, Hastings A, Valentine J, Donnison I. 2011.** Thermal requirements for seed germination in Miscanthus compared with Switchgrass (*Panicum virgatum*), Reed canary grass (*Phalaris arundinaceae*), Maize (*Zea mays*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*). *GCB Bioenergy* **3**: 375-386.
- Courteau A. 2005.** La canne à sucre et l'environnement à La Réunion: revue bibliographique.
- Cuadra SV, Costa MH, Kucharik CJ, Da Rocha HR, Tatsch JD, Inman-Bamber G, Da Rocha RP, Leite CC, Cabral OMR. 2012.** A biophysical model of Sugarcane growth. *GCB Bioenergy* **4**: 36-48.
- D'Hont A, Rao PS, Feldmann P, Grivet L, Islam-Faridi N, Taylor P, Glaszmann JC. 1995.** Identification and characterisation of sugarcane intergeneric hybrids, *Saccharum officinarum* x *Erianthus arundinaceus*, with molecular markers and DNA in situ hybridisation. *Theoretical and Applied Genetics* **91**: 320-326.
- Directorate General for Research and Innovation. 2005.** Biomass - Green energy for Europe. Luxembourg, European Commission.
- Doust A. 2007.** Architectural evolution and its implications for domestication in grasses. *Annals of Botany* **100**: 941-950.
- Evensen CI, Muchow RC, El-Swaify SA, Osgood RV. 1997.** Yield Accumulation in Irrigated Sugarcane: I. Effect of Crop Age and Cultivar. *Agron. J.* **89**: 638-646.
- Ezaki B, Nagao E, Yamamoto Y, Nakashima S, Enomoto T. 2008.** Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses. *Plant Cell Reports* **27**: 951-961.
- F.O.Light. 2011.** Gmbh, Ratzeburg, Allemagne.
- Fauconnier R. 1984.** *La canne à sucre*, Montpellier: Cirad- Irat.
- Fauconnier R, Bassereau D. 1970.** *La Canne à sucre*, Paris: Editions Maisonneuve et Larose.
- Gascho GJ, Ruelke OC, West SH. 1973.** Residual Effects of Germination Temperature in Sugarcane. *CROP SCIENCE* **13**: 274-276.
- Girard J-C, Rott P. 2000.** Pineapple disease. In: Philippe Rott, Roger A. Bailey, Jack C. Comstock, Barry J. Croft, A. Salem Saumtally eds. *A guide to sugarcane diseases* Montpellier, La librairie du Cirad.
- Goble TA, Costet L, Robene I, Nibouche S, Rutherford RS, Conlong DE, Hill MP. 2012.** *Beauveria brongniartii* on white grubs attacking sugarcane in South Africa. *Journal of Invertebrate Pathology* **111**: 225-236.
- Goebel FR, Way M. 2009.** Crop losses due to two sugarcane stem borers in Réunion and South Africa. *Sugar Cane International* **27**: 107-111.

- Goebel R. 1999.** *Caractéristiques biotiques du foreur de la canne à sucre Chilo sacchariphagus (Bojer, 1856). (Lepidoptera : Pyralidae) à l'Île de La Réunion. Facteurs de régulation de ses populations et conséquence pour la lutte contre le ravageur.* PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Gonzalez-Real MM, Baille A. 2000.** Changes in leaf photosynthetic parameters with leaf position and nitrogen content within a rose plant canopy (*Rosa hybrida*). *Plant, Cell & Environment* **23**: 351-363.
- Goodall J, Bailey R, Laing M. 1998.** Improving germination of single-budded sugarcane setts using thermotherapy and fungicide treatments. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. **72**: 85-90.
- Guimarães de Andrade Landell M, Pércio Campana M, Figueiredo P. 2012.** *Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas.*, Campinas (SP) Brazil
- Hellmann M, Siegmund B, Poser C, Courteau A, Mandret G. 2005.** Une recherche de qualité qui contribue au dynamisme de la filière canne-sucre de La Réunion. Diaporama ed. Saint Denis, Cirad-Cerf.
- Hothorn T, Bretz F, Westfall P. 2008.** Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal* **50**: 346-363.
- Inman-Bamber NG. 1991.** A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and CERES - maize water balance. *S. Afr. J. Plant Soil* **8**: 93-99.
- Inman-Bamber NG. 1994.** Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crops Research* **36**: 41-51.
- Jeuffrault E, Rolet A, Reynaud B, Manikom R, Georger S, Taye T, Chiroleu F, Fouillaud M, Vercambre B. 2004.** Vingt ans de lutte contre le ver blanc de la canne à sucre à la Réunion : Un succès, mais il reste des questionnements scientifiques pour confirmer la durabilité de la lutte biologique. *Phytoma-Ldv* **573**: 16-19.
- Jumaux G, Quetelard H, Roy D. 2011.** *Atlas climatique de La Réunion*: © Météo-France.
- Kuijper J. 1914.** De bouw der huidmondjes van suikerriet. *Archief Suikerind* **22**: 1679-1690.
- Lafitte HR, Edmeades GO, Johnson EC. 1997.** Temperature responses of tropical maize cultivars selected for broad adaptation. *Field Crops Research* **49**: 215-229.
- Lagabrielle E, Metzger P, Martignac C, Lortic B, Duriex M. 2007.** Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002). *M@ppemonde* **86**: 23 p.
- Lajoie G, Actif N. 2001.** Des villes jardins qui s'étalent depuis dix ans in Dossier: La ville s'étale. *Economie de la Réunion*
- Lajoie G, Hagen-Zanker A. 2007.** La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. <http://cybergeog.revues.org/11882> (consulté le 07 janvier 2013).
- Lang GA, Martin GC, Darnell RL. 1987.** Endo-, para- and ecodormancy: physiological terminology and classification for dormancy research. *HortScience* **22**: 371-377.
- Larsen SU, Bibby BM. 2004.** Use of germination curves to describe variation in germination characteristics in three turfgrass species. *Crop Science* **44**: 891-899.

- Larsen SU, Bibby BM. 2005.** Differences in Thermal Time Requirement for Germination of Three Turfgrass Species. *Crop Sci.* **45**: 2030-2037.
- Lauri PÉ, Kelner JJ, Trottier C, Costes E. 2010.** Insights into secondary growth in perennial plants: its unequal spatial and temporal dynamics in the apple (*Malus domestica*) is driven by architectural position and fruit load. *Annals of Botany* **105**: 607-616.
- Le Bris M, Champeroux A, Bearez P, Le Page-Degivry MT. 1998.** Basipetal gradient of axillary bud inhibition along a rose (*Rosa hybrida*L.) stem: growth potential of primary buds and their two most basal secondary buds as affected by position and age. *Annals of Botany* **81**: 301-309.
- le Grand F. 1972.** *Production of sugarcane*, Gainesville: University of Florida.
- Lecaille M. 2012.** *Etude de l'implantation d'une nouvelle variété de canne à sucre dans Les Hauts de l'île de La Réunion à l'aide d'un outil cartographique*. Master 2 UNiversité Paul Valéry, Montpellier
- Lehenbauer PA. 1914.** Growth of maize seedlings in relation to temperature. *Physiol. Res.* **5**: 247-288.
- Lemaire T, Robert G. 1973.** *Manuel du planteur* Abymes, Guadeloupe: C.T.C.S.
- Lescourret F, Blecher N, Habib R, Chadoeuf J, Agostini D, Pailly O, Vaissière B, Poggi I. 1999.** Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management. *Agricultural Systems* **59**: 215-239.
- Liu DL, Kingston G, Bull TA. 1998.** A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. *Agricultural and Forest Meteorology* **90**: 119-139.
- Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, Mastrandrea MD, Falcon WP, Naylor RL. 2008.** Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* **319**: 607-610.
- Malik KB, Ali FG, Nayyar MM. 1990.** Different sized stripped and unstripped setts effect on germination in sugarcane. *Journal of Agricultural Research* **v. 28(1)**: p. 9-17.
- Marcelis-Van Acker CAM. 1994.** Development and growth potential of axillary buds in roses as affected by bud age. *Annals of Botany* **74**: 437-443.
- Marion D, Marnotte P. 1991.** Nuisibilité de l'enherbement sur une culture de canne à sucre. 1ère Rencontre internationale en langue française sur la canne à sucre. Montpellier (FR) 188-191.
- Martignac C. 2006.** *Maintien d'une filière dominante ou projet de territoire : le cas du sucre à la Réunion*. Thèse de doctorat, Montpellier.
- Martignac C, Pariente P. 2003.** Canne à sucre, état des lieux: les planteurs entre patrimoine et productivité. *Economie de la Réunion*
- Martiné J-F. 2003.** *Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle*. Thèse de doctorat, Agronomie, Paris, INAPG.

- Martiné J-F, Siband P-L, Bonhomme R. 1999.** Simulation du rendement maximal de la canne à sucre à différentes altitudes : effet de la température sur la conversion du rayonnement en biomasse. *Agronomie* **19**: 3-12.
- Martiné J-F, Todoroff P. 2002.** Le modèle de croissance Mosicas et sa plateforme de simulation Simulex : Etat des lieux et perspectives. *10^{ème} Congrès STASM (2002) Le Réduit - Ile Maurice* **81**: 133-147.
- Martinho L, Bochi M, Jepson I, Moreira M, Souza DC, Carvalho JC. 2010.** Plene, an innovative approach for sugarcane planting in Brazil. Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist. Veracruz, Mexico **27**: 1-10.
- Mather RN. 1941.** Proc. Sugar Tech. Assoc. India. 10 p.
- McMahon G, Lawrence P, O'Grady T. 2000.** Weed control in sugarcane. In: Hogarth DM, Allsopp PG eds. *Manual of Canegrowing*. Brisbane (AU), BSES.
- McMaster GS, Wilhelm WW, Palic DB, Porter JR, Jamieson PD. 2003.** Spring Wheat Leaf Appearance and Temperature: Extending the Paradigm? *Annals of Botany* **91**: 697-705.
- Miller C, Skoog F. 1953.** Chemical control of bud formation in tobacco stem segments. *Am. J. Bot* **40**: 768-773.
- Molish H. 1916.** *Pflanzenphysiologie als Theorie der Gärtnerei*, Jena, Deutschland: Verlag von Gustav Fischer.
- Mongelard JC, Mimura L. 1972.** Growth Studies of the Sugarcane Plant. II. Some Effects of Root Temperature and Gibberellic Acid and Their Interactions on Growth1. *Crop Sci.* **12**: 52-58.
- Morandini M, Figueroa R, Zamora P, Scandaliaris. 2005.** The effect of green-cane trash blanket on soil temperature, soil moisture and sugarcane growth. Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist **25**: 231-237.
- Moreau-Valancogne P, Coste F, Crozat Y, Dürr C. 2008.** Assessing emergence of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed lots in France: Field observations and simulations. *European Journal of Agronomy* **28**: 309-320.
- Müller D, Leyser O. 2011.** Auxin, cytokinin and the control of shoot branching. *Annals of Botany* **107**: 1203-1212.
- Nibouche S, Tibère R. 2008.** Damage assessment for selection of resistance to the spotted stalk borer and genetic correlations for resistance and yield components in sugarcane. *Plant Breeding* **127**: 38-42.
- Nibouche S., Costet L., Thong-Chane A., Martiné J.-F., D'Hont A., D L. 2010.** DELICAS-Association mapping and model phenotyping in sugarcane. Séminaire Génoplande Pont-Royal Provance, France 1.
- Normand F, Léchaudel M. 2006.** Toward a Better Interpretation and Use of Thermal Time Models. Proc. VIIth IS on Modelling in Fruit Research.
- Novoplansky A. 1996.** Hierarchy establishment among potentially similar buds. *Plant, Cell & Environment* **19**: 781-786.

- Novoplansky A. 2003.** Ecological implications of the determination of branch hierarchies. *New Phytologist* **160**: 111-118.
- O'Callaghan JR. 1994.** Introduction: Simulation models of crop growth and technology transfer. *Computers and Electronics in Agriculture* **11**: 291-292.
- Parent B, Tardieu F. 2012.** Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytologist* **194**: 760-774.
- Perret S. 1992.** *Etude des propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons cultureux, implications agronomiques et écologiques.* PhD these, , Montpellier.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, Team RDC. 2011.** *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*,
- Polák T, Albrechtová J, Rock BN. 2006.** Bud development types as a new macroscopic marker of Norway spruce decline and recovery processes along a mountainous pollution gradient. *Forestry* **79**: 425-437.
- Poser C, Barau L, Lecaille M, Mézino M, Ruget F. 2012.** Effet de la température seuil de développement sur la répartition géographique d'une variété. *Congrès sucrier ARTAS / AFCAS 2012*. La Réunion - Ile Maurice
- Pouzet D. 2011.** *Production durable de biomasse. La lignocellulose des poacées*
- Pouzet D, Poser C, Hellmann M. 2004.** Restitution de l'atelier "La canne à sucre dans les Hauts de La Réunion", CD-ROM. *Séminaire "Quelles recherches pour l'avenir de la filière canne-sucre à l'horizon 2007-2013 ?"*. Du 20 au 23/09/2004 - Saint-Denis - La Réunion, Cirad , CD-ROM.
- Rainelli P. 2007.** L'avenir des biocarburants et incidences sur l'équilibre des marchés agricoles. In: © Notre Europe ed.
- Robertson MJ, Wood AW, Muchow RC. 1996.** Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research* **48**: 11-25.
- Roguet S. 2010.** *Etude du facteur température dans l'adaptation de variétés de canne à sucre dans les Hauts de La Réunion.* Mémoire de fin d'études, Institut Supérieur des Techniques d'Outre-Mer (ISTOM), Cergy-Pontoise F-95094.
- Rohde A, Van Montagu M, Inzé D, Boerjan W. 1997.** Factors regulating the expression of cell cycle genes in individual buds of cell cycle genes in individual buds of *Populus*. *Planta* **201**: 43-52.
- Romero ER, Scandaliaris J, Tonatto J, Leggio Neme M, Sotomayor L. 2005.** Effects of different management factors on plant cane emergence in tucuman - Argentina. *Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist* **25**: 246-250.
- Romero ER, Scandaliaris J, Rufino M, Perez Zamora F. 2001.** Biothermal models to predict plant cane emergence. *Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist* **24**: 95-100.
- Rott P, Bailey RA, Comstock JC, Croft BJ, Saumtally AS. 2000.** *A guide to sugarcane diseases* Montpellier: Cirad - ISSCT.

- Ruget F, Bonhomme R, Chartier M. 1996.** Estimation simple de la surface foliaire de plantes de maïs en croissance. *Agronomie* **16**: 553-562.
- Ruget F, Duburcq J-B. 1983.** Développement reproducteur des bourgeons axillaires chez le maïs : stades de différenciation, nombre de fleurs. *Agronomie* **3**: 797-808.
- Singels A, Jones M, van den Berg M. 2008.** DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module - Scientific documentation. International Consortium for Sugarcane Modelling (ICSM) - South African Sugarcane Research Institute (SASRI).
- Singels A, Smit MA. 2002.** The effect of row spacing on a irrigated plantcrop of sugarcane variety NCO376. *Proceedings of South African Sugar Technologists' Association*.
- Singels A, Smit MA, Redshaw KA, Donaldson RA. 2005.** The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field Crops Research* **92**: 249-260.
- Singh S, Srivastava KK. 1975.** Effect of soil-water potential in germination of sugarcane setts (India). *Indian Journal of Agricultural Sciences* **v. 44(4)**: p. 184-187.
- Smit MA. 2011.** Characterising the factors that affect germination and emergence in sugarcane. *Sugarcane International* **113**: 65-67.
- Smith DM, Inman-Bamber NG, Thorburn PJ. 2005.** Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research* **92**: 169-183.
- Soares RAB, Oliveira PFM, Caroso HR, Vasconcelos AC, Landell MGA, Rosenfeld U. 2004.** Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-acúcar colhidas em início de safra. *STAB-Açúcar Alcool e Subprodutos* **22**: 38-41.
- Soopramanien GC. 2000.** Sugarcane morphology, anatomy and physiology. In: Philippe Rott, Roger A. Bailey, Jack C. Comstock, Barry J. Croft, A. Salem Saumtally eds. *A guide to sugarcane diseases* Montpellier, La librairie du Cirad.
- Stolf R. 1986.** Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. Sociedade dos Técnicos Açucareiros Alcooleiros do Brasil (STAB) Piracicaba **6**: 22-36.
- Stolf R, Iaia AM, Lee TSG. 1986.** Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em cana-planta. *Brasil Açucareiro* **104**: 44-50.
- Stolf R, Iaia AM, Lee TSG. 1991.** Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. *Alcool e Açúcar* **11**: 12-16.
- Thompson GD. 1988.** Comparisons of the growth of plant and first ratoon crops at Pongola. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association*. **62**: 180-184.
- Timson J. 1965.** New method of recording germination data. *Nature* **207**: 216-217.
- Valy A. 1990.** L'installation des jeunes agriculteurs dans les Hauts de l'Ouest. Le modèle géranium/diversification.
- van Antwerpen R, Meyer JH, Thompson G. 2006.** The impact of trashing on yield response in the south african sugar industry: a summary of results from several BT trials. *Proceedings of South African Sugar Technologists' Association*.

- Van Dillewijn C. 1952.** *Botany of Sugarcane*, Waltham, Mass: Chronica Botanica Co.
- Vaxelaire D. 2001.** *Le Grand Livre de l'Histoire de La Réunion, Vol 2: de 1848 à nos jours*: Orphie Editions.
- Venkatraman TS. 1926.** Studies in sugarcane germination. *Agric. Jour. India*. **21**: 103-106.
- Vercambre B, Goebel R, Cao Anh D, Rochat J. 2001.** Available methods for assessing varietal resistance to sugarcane stalk borers. Proceedings of the International Society Sugar Cane Technologist **75**: 175-179.
- Viator RP, Johnson RM, Boykin DL, Richard EP. 2009.** Sugarcane Postharvest Residue Management in a Temperate Climate *Crop Sci.* **49**: 1023-1028.
- Viator RP, Johnson RM, Richard EP, Jr. 2005.** Challenges of post-harvest residue management in the Louisiana sugarcane industry. *Sugar Cane International* **23**: 3-6.
- Vivet J-B. 2005.** *Pérennisation d'une filière menacée à La Réunion: le cas de la culture cannière irriguée des Hauts de l'Ouest*. Mémoire de fin d'études, Institut Supérieur des Techniques d'Outre-Mer (ISTOM), Cergy-Pontoise F-95094.
- Wilcox T, Garside A, Braunack M. 2000.** The sugarcane cropping system. In: Hogarth DM, Allsopp PG eds. *Manual of Canegrowing*. Brisbane (AU), BSES.
- Wood. 1991.** Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. *Soil Tillage Research* **20**: 69-85.
- Yin X, Kropff MJ. 1996.** The Effect of Temperature on Leaf Appearance in Rice. *Annals of Botany* **77**: 215-221.
- Yin X, Kropff MJ, McLaren G, Visperas RM. 1995.** A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* **77**: 1-16.
- Zalewska M, Miler N, Wenda-Piesik A. 2010.** Effect of in vitro topophysis on the growth, development, and rooting of chrysanthemum explants (*Chrysanthemum X grandiflorum*/ Ramat./Kitam). *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* **85**: 362-366.
- Zamski E, Oshri S, Zieslin N. 1985.** Comparative morphology and anatomy of axillary buds along a rose shoot. *Botanical Gazette* **146**: 208-212.
- Zhou M, Singels A, Savage MJ. 2003.** Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. **77**: 610-621.
- Zuurbier P, van de Vooren J. 2008.** Sugarcane ethanol. Wageningen Academic Publisher.

Liste des Figures

Figure 1. Le rêve au XIXe siècle d'une canne à sucre géante	3
Figure 2. Demande de sucre dans le monde en regard à la croissance démographique mondiale	19
Figure 3. Evolution de la production sucrière mondiale et des parts respectives canne à sucre / Betterave	20
Figure 4. Evolution de la production d'alcool (éthanol) dans le monde (en milliers d'hectolitres).....	21
Figure 5. Distribution géographique de la production mondiale de sucre	22
Figure 6. Plant de canne à sucre.....	24
Figure 7. Cycle de la canne à sucre : Processus physiologiques et stades agronomiques	25
Figure 8. Distribution géographique des parcelles sous production de canne à sucre à La Réunion et tonnages par versants, par centres de collecte et par usine.	27
Figure 9. Origine de la tâche urbaine entre 1989 à 2002.....	29
Figure 10. Limites des Hauts de la Réunion et parcellaire cannier	30
Figure 11. Carte pédologique de La Réunion	31
Figure 12. Moyenne décadaires des températures minimales de l'air sur 10 ans (2002-2011) pour les stations météorologiques des Colimaçons (790 m) et La Mare (70 m).	32
Figure 13. Carte des isothermes du mois d'Août de La Réunion (moyennes sur 10 ans).....	32
Figure 14. Pluviométrie moyenne annuelle en années sèches, médianes et humides (mm).....	33
Figure 15. Moyennes décadaires des pluie et de l'ETP sur 3 Stations de la côte Ouest (Nombre d'années de référence entre parenthèses).....	34
Figure 16. Analyse fréquentielle de la pluviométrie mensuelle (mm) à Le Plate (840 m) entre 1969 et 1999	35
Figure 17. Distribution des variétés sur l'île de La Réunion en 2011 et localisation des stations eRcane.	39
Figure 18. Plantation des variétés R 583 et R 585 lors des saisons 2009-2010, 2010-2011, et 2011-2012 sur les côtes Ouest et Est.	40
Figure 19. Dessin d'une jeune pousse en canne plantée.	42
Figure 20. Dessin d'une souche constituée d'une bouture de quatre bourgeons.....	43
Figure 21. Moyenne décadaires des températures agricoles ((Min+Max)/2) du sol (2009-2011) pour les stations météorologiques des Colimaçons (790 m) et La Mare (70 m).	44
Figure 22. Évolutions des efficacités d'interception observées dans le temps (en jour après coupe)	45
Figure 23. Évolutions des efficacités d'interception observées dans le temps (en somme des degrés-jours Tb= 12)	45
Figure 24. Rendements observés et simulés par le modèle « Mosicas » sur des parcelles de canne à sucre	46

Figure 25. Évolutions respectives de l'accumulation de biomasse produite dans le temps à trois périodes (Début, Milieu et Fin) pour une canne A : en cycle de plantation et B, en cycle de repousse.....	47
Figure 26. Fréquence mensuelle des plantations	48
Figure 27. Numérotation des bourgeons,	58
Figure 28. Essai 1 : Nombre de bourgeons par tige par variété (R 570 et R583) et par température (18°C et 24°C)	62
Figure 29. Essai 1 : Distribution de la durée nécessaire au débourrement des bourgeons centraux pour deux variétés R570 et R583 à deux températures 18°C et 24°C.....	70
Figure 30. Essai 1 : Teneur en sucre moyennes de boutures selon leur classe topophysique de provenance sur le plan mère et selon la variété et selon leur succès de levée.	71
Figure 31. Essai 1 : Production moyenne de racines par bouture.....	72
Figure 32. Températures moyennes décadaires de l'air aux Colimaçons (790 m)	86
Figure 33. Exp.1, exp.2 et exp.3 : Moyennes horaires des températures en chambres climatiques.....	87
Figure 34. A : Exp.4 et B : exp. 5 : Moyennes journalières des températures fluctuantes	88
Figure 35. Exp.1. Evolution des taux journaliers de levée (en pourcent) pour 6 variétés mises en condition de levée dans des chambres climatiques aux températures constantes de 15, 19, 23 et 28°C.	96
Figure 36. Taux de levée en pourcentage de chaque variété selon la température (en °C).....	96
Figure 37. Exp. 1 : Représentation du modèle de débourrement.....	99
Figure 38. Exp. 1 : Précision du modèle de débourrement.....	100
Figure 39. Représentation des dynamiques prédites par le modèle de débourrement de 6 variétés à 3 températures constantes et points observés (A) taux de levées absolus (B) taux de levées relatifs (ramenés à 100). Remarque le clone R92/804 devient R585 en 2010.	101
Figure 40. Prédiction du modèle T3 pour la demi-levée	102
Figure 41. Exp. 3 : <i>Evolution des taux de levée</i>	103
Figure 42. Exp. 3 : Profils thermiques.....	104
Figure 43. A : Exp. 1 ; B : Exp. 2 et C : Exp. 3 - Teneur en sucres de la variété R570	106
Figure 44. A : Exp. 1, B : Exp. 2 et C : Exp. 3 - Teneur en sucres de la variété R583	107
Figure 45. A : Exp. 1 Haut ; exp. 3 Bas et exp. 3 Haut - Profils de teneur en sucres de la variété R579	108
Figure 46. Exp. 1 Bas 10,5 mois; exp. 3 Bas 14 mois et exp. 3 - Profils de teneur en sucres de la variété R582	109
Figure 47. Exp. 1, exp. 2 et exp. 3 - Taux de levée observés et simulés des variétés R570 et R583.	112
Figure 48. Exp. 4 et exp. 5 - Taux de levée observés et simulés des variétés R570, R577 et R583	114
Figure 49. Exp. 5 - Evolution de l'humidité dans le sol.....	115
Figure 50. Exp. 5 - Températures journalières en °C dans le sol sur le site des Colimaçons.....	117
Figure 51. Exp. 5 - Plans de l'essai	123
Figure 52. Exp. 5 - Températures moyennes agricoles journalières	124
Figure 53. Exp. 5 - Evolution de l'humidité relative et apports d'eau.....	125

Figure 54. Nombre de tiges par hectare pour 5 variétés sur 2 sites.	128
Figure 55. Evolution du nombre moyen de tiges par hectare.....	129
Figure 56. Exp. 5 - Evolution du nombre moyen de tiges sur le site de La Mare.....	130
Figure 57. Hauteur de tige (cm) pour 5 variétés sur 2 sites.	132
Figure 58. Evolution de la hauteur moyenne des tiges.....	133
Figure 59. Evolution de la hauteur moyenne des tiges.....	134
Figure 60. Evolution de la hauteur moyenne des tiges.....	135
Figure 61. Nombre de feuille par tige primaire en fonction du jour après débourrement pour 5 variétés sur deux sites.	137
Figure 62. Nombre de feuilles émises après débourrement.....	138
Figure 63. Nombre de feuilles émises.....	140
Figure 64. Surface des feuilles adultes selon leur rang sur la tige	141
Figure 65. Pourcentages de l'Interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR).....	141
Figure 66. Pourcentages de l'Interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR).....	143
Figure 67. Zonage pour la définition de régimes thermiques en vu de la représentation d'aptitude à l'implantation des variétés nouvelles.....	154
Figure 68 A et B. Nombre de jours nécessaires pour atteindre la demi-levée (50 % des boutures ayant levées) pour deux températures seuils de 11°C (A) ou 13°C (B), Plantation au 15 octobre, Années de référence : 2001-2010.....	156
Figure 69. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R570.....	178
Figure 70. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R583.....	179
Figure 71. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R577.....	180
Figure 72. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient R585 en 2010.	181
Figure 73. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R579.....	182
Figure 74. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R581.....	183
Figure 75. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété NCo376.....	184
Figure 76. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R582.....	184
Figure 77. Moyenne; Moyennes agricole, minimum et maximum des températures journalières de l'air et du sol au champ (exp. 5) au cours du processus de débourrement-levée pour les deux sites selon les dates (en jour après plantation) A- Les Colimaçons : B- La Mare	186
Figure 78 Comparaison entre A : Températures seuil (en °C), B : demi-levée (en degré.jour) et C : étalement entre variétés (en degré.jour) pour 8 variétés.....	187

Liste des tableaux

Tableau 1. Effets des paramètres climatiques sur les processus	26
Tableau 2. Essais 1 et 2 : Protocole résumé des sur canne à sucre en boutures à un seul bourgeon	57
Tableau 3. Essais 1 et 2 : Effectifs.....	61
Tableau 4. Essai 1 : Nombre de bourgeon débourrés en fonction de leur position originale le long de la tige-mère	63
Tableau 5. Essais 1 et 2 : Durées de débourrement par bourgeon et tige pour	64
Tableau 6. Essai 2 : Effectifs levées selon raccourcissement	66
Tableau 7. Essai 1 : Effectifs levées	67
Tableau 8. Essai 2 : Effectifs levées	68
Tableau 9. Essai 1 : Effectifs levées des milieux de tiges.....	69
Tableau 10. Année de libération des variétés réunionnaises et sud africaines, zone d'adaptation (sources eRcane, Sasri), présence dans essais.....	85
Tableau 11. Historique de l'accumulation de température et de rayonnement des pieds-mères des boutures utilisées pour les essais exp.1 à exp.5.	91
Tableau 12. Températures seuils, paramètres des modèles moyens et durée (en somme de degré.jour au dessus du seuil) de la demie levée et de l'étalement de la levée (50% de la population levée) pour 8 variétés à 3 températures.	98
Tableau 13. Valeurs estimées des paramètres du modèle d'émission de tiges	130
Tableau 14. Densité de tiges	131
Tableau 15. Valeurs estimées des paramètres du modèle de croissance de tiges sur le site de La Mare.....	134
Tableau 16. Résultat des tests de variance sur le processus de croissance des tiges de 5 variétés sur 2 sites.	135
Tableau 17. Valeurs estimés du modèle d'émission de feuilles.....	139
Tableau 18. Valeurs estimées des paramètres du modèle de fermeture du couvert sur le site de La Mare.....	142
Tableau 19. Récapitulatif des tests et classements sur les processus ou critères phénologiques de 5 variétés.....	144

Liste des Photographies

Photo 1. XXIème siècle : le rêve d'une canne géante perdue	4
Photo 2. Concurrence de l'enherbement lors de l'implantation de la culture	36
Photo 3. Enracinement de la bouture.	42
Photo 4. Préparation des boutures et boutures en chambre climatiques.....	63
Photo 5. Parcelles d'essai A, Lors de la mise en place de l'essai aux Colimaçons ; B, Au stade de levée à La Mare (EXp.5).	136

Annexes

1. Levées prédites et observées par variétés et par essais

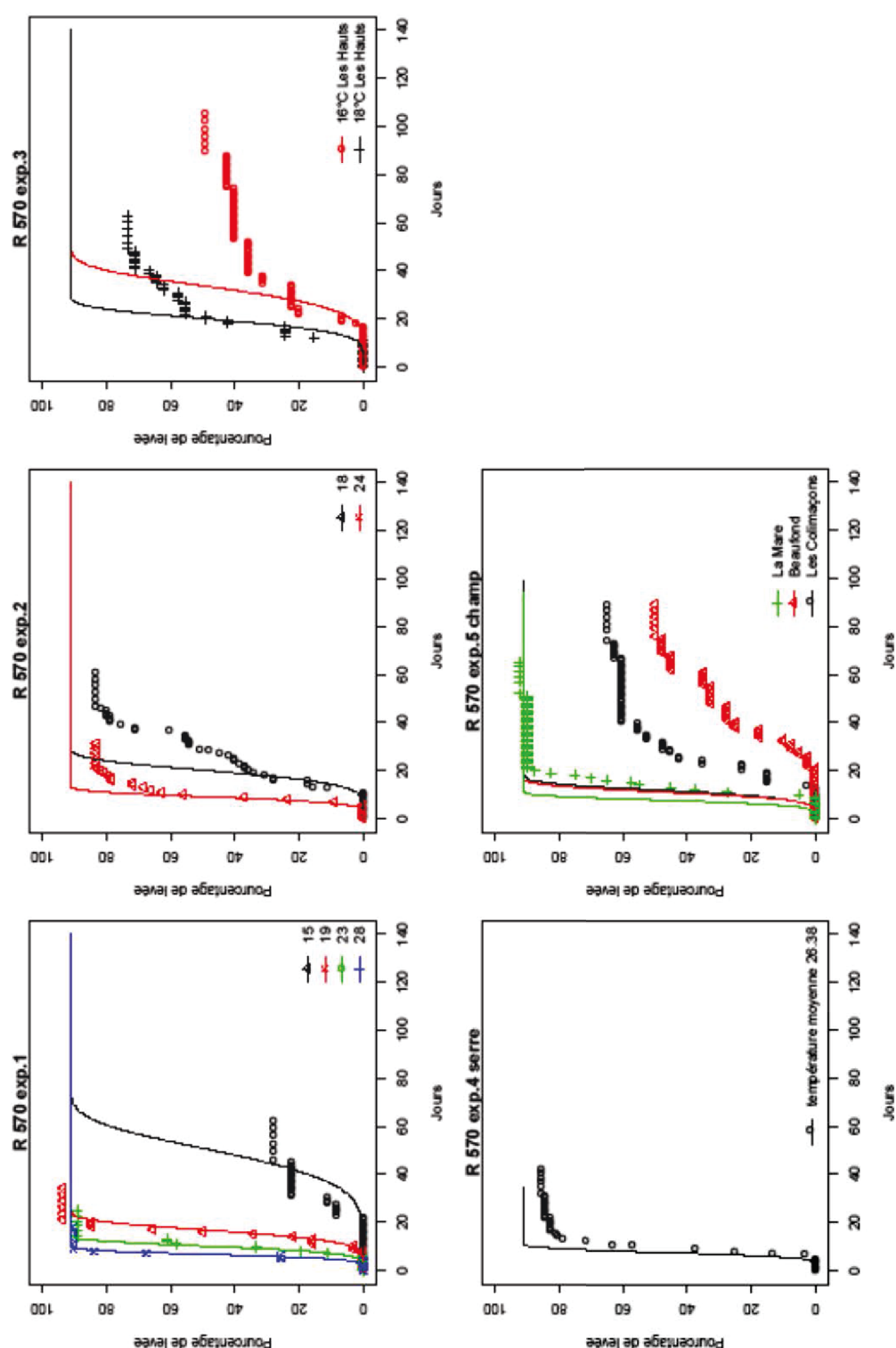


Figure 69. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R570.

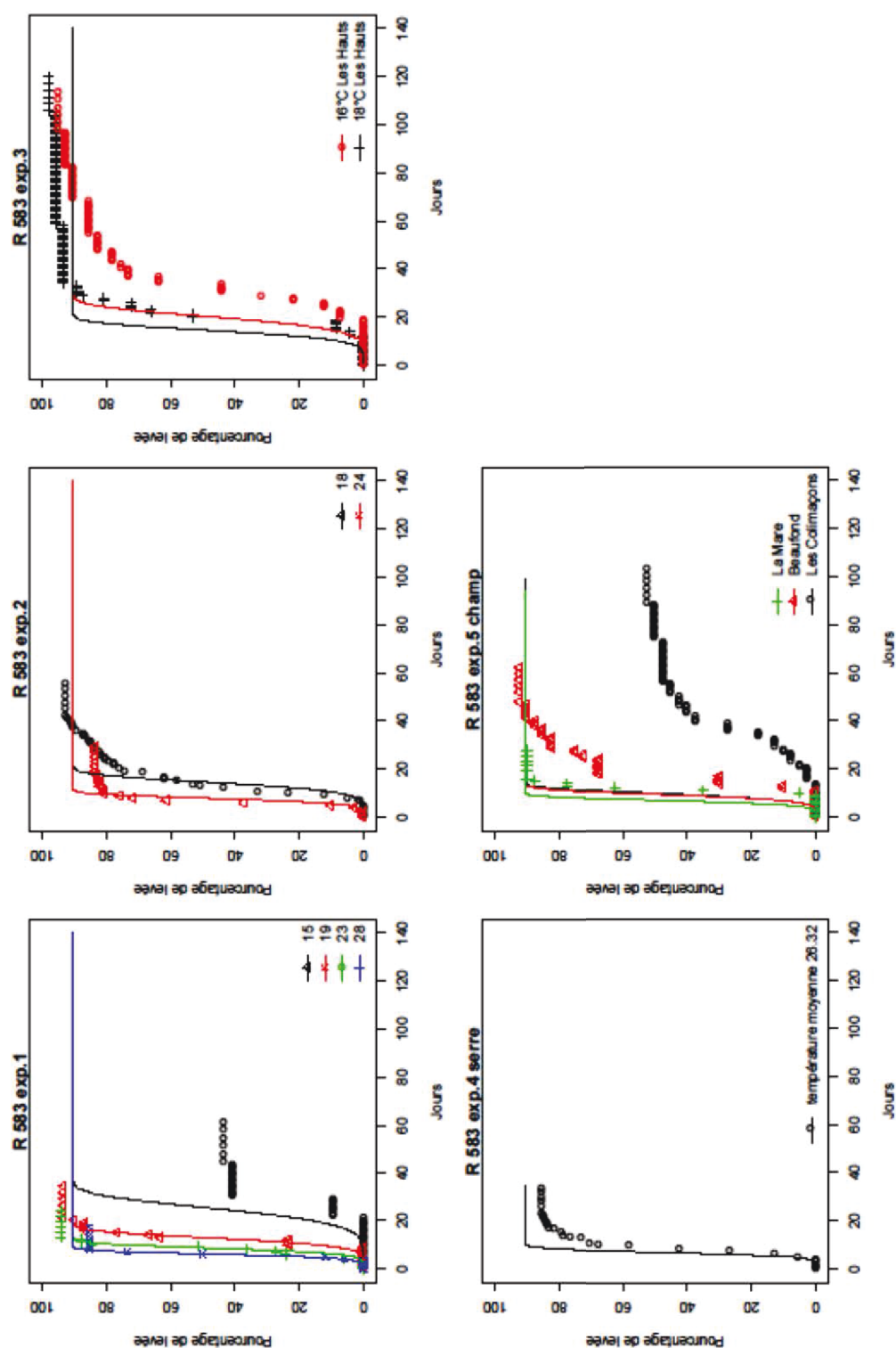


Figure 70. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R583.

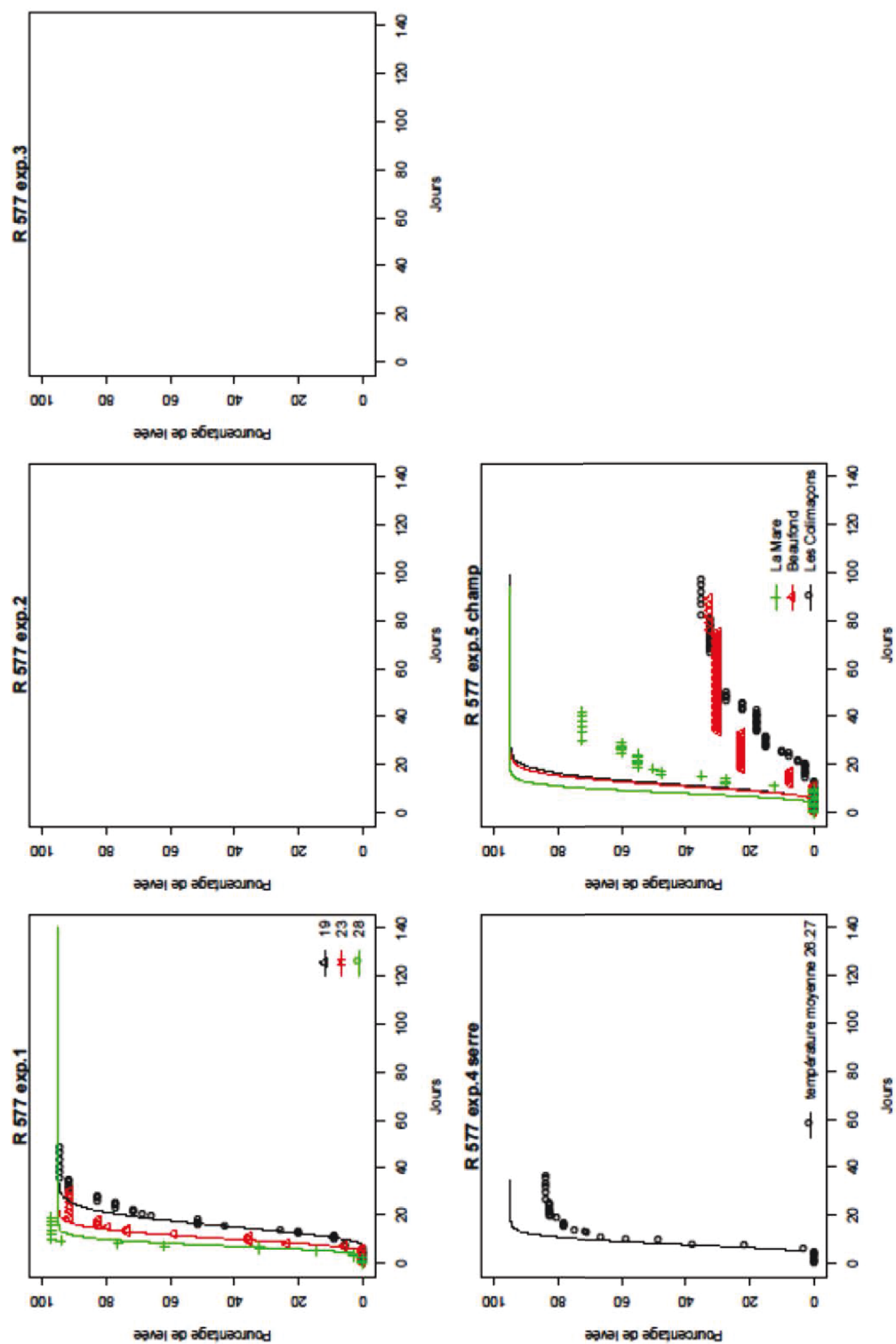
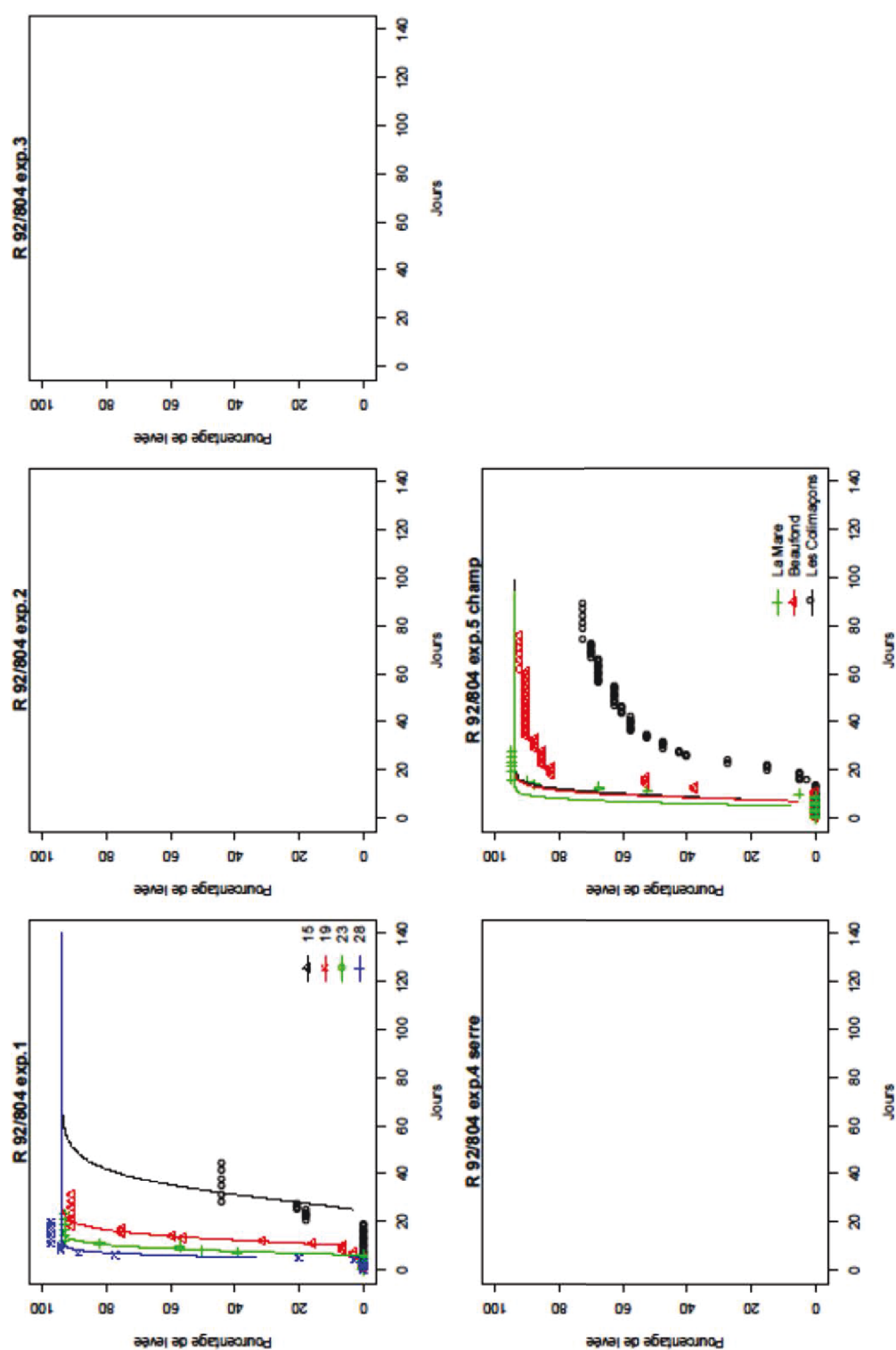


Figure 72

Figure 71. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R577.



. Figure 73. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient R585 en 2010.

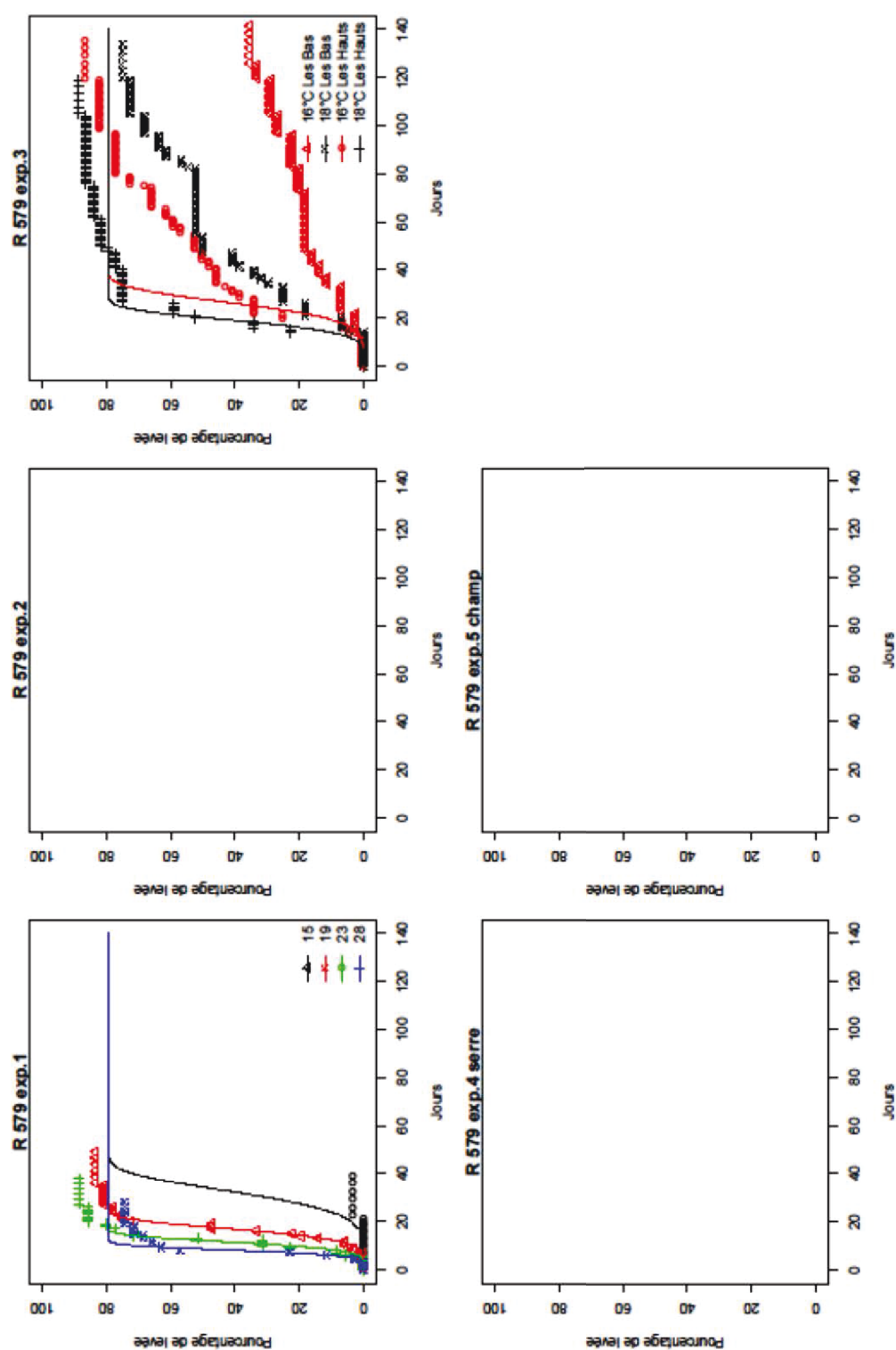


Figure 74. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient R579.

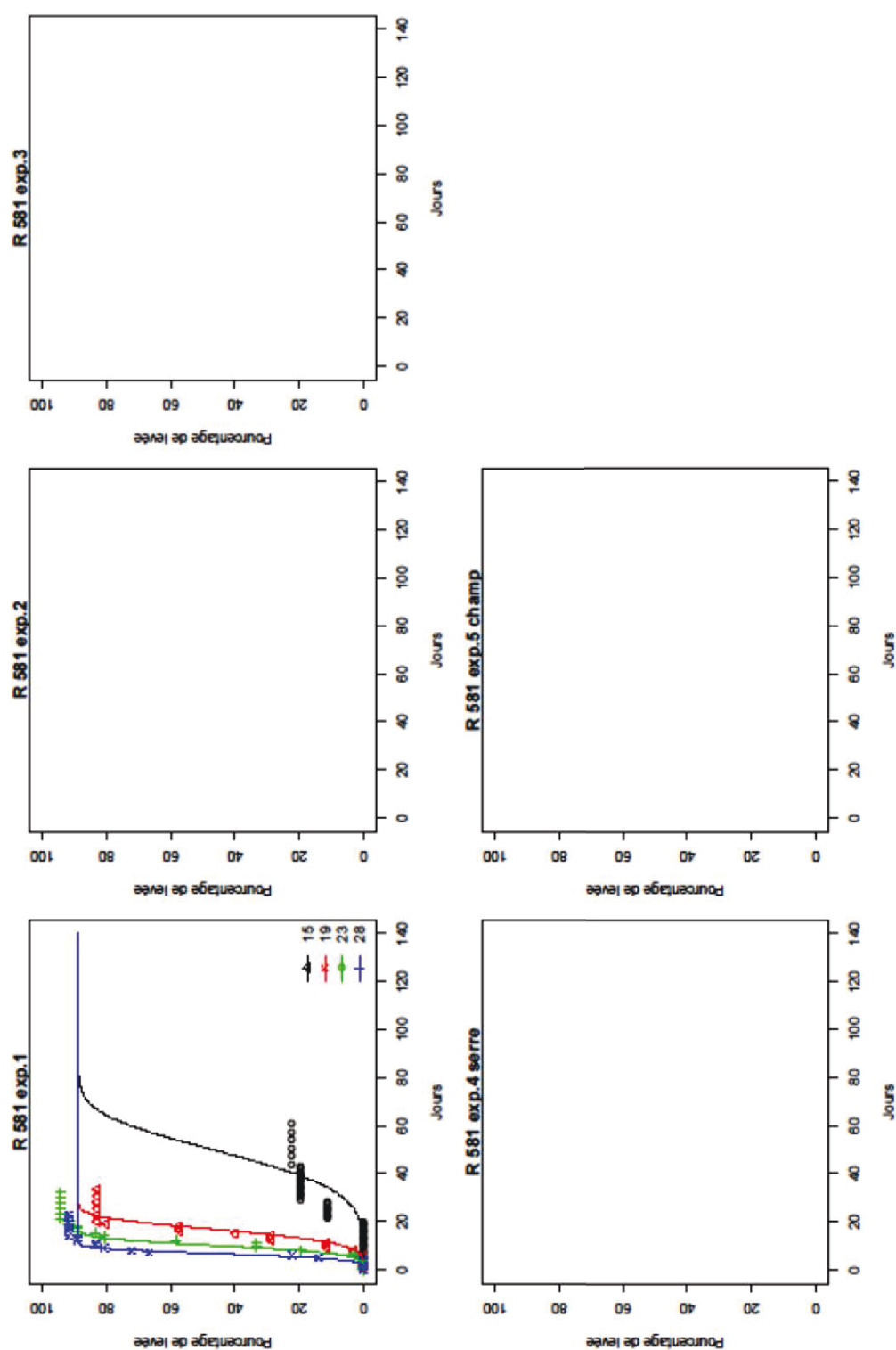


Figure 75. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient R581.

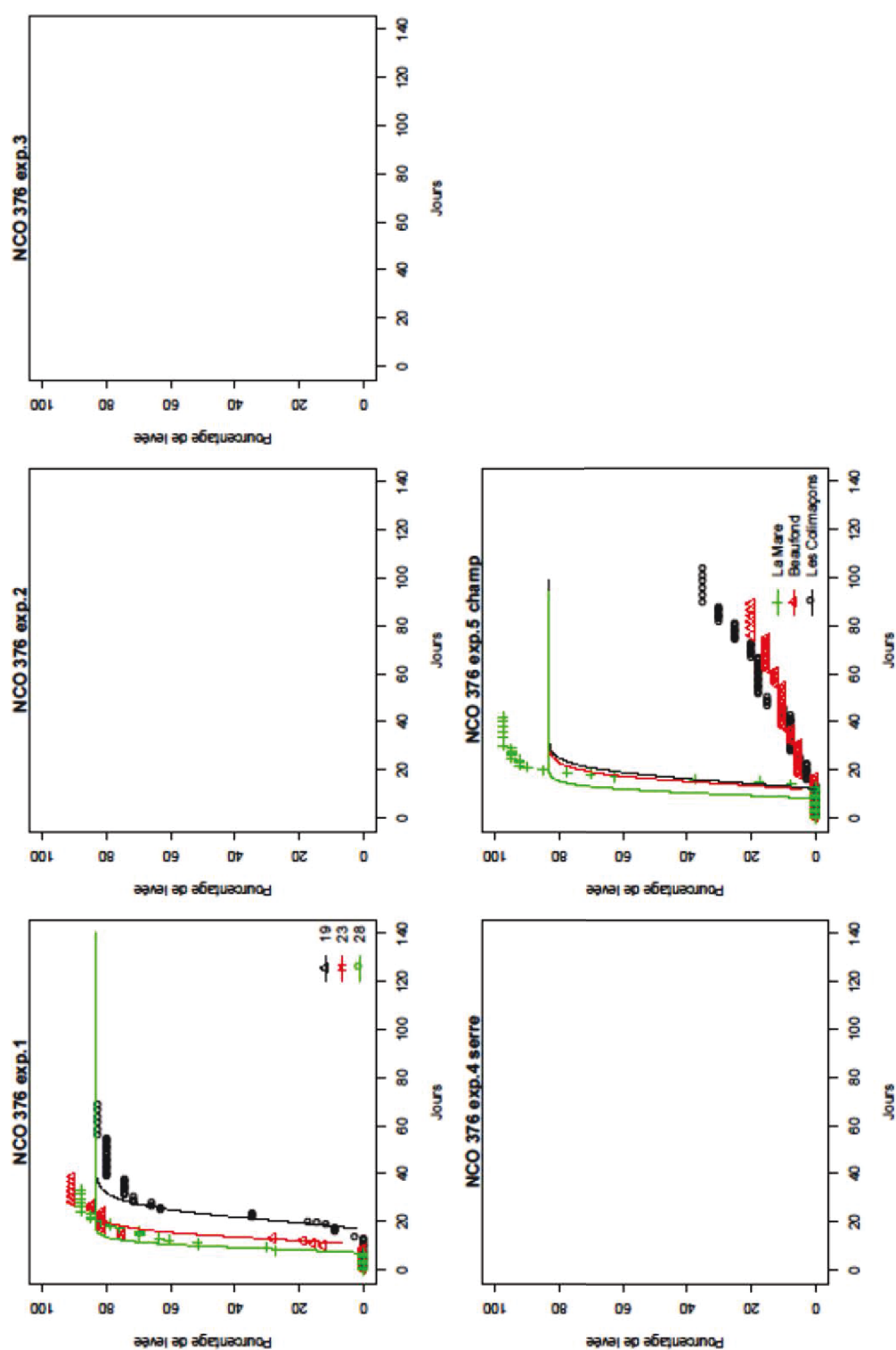


Figure 76. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient NCo376.

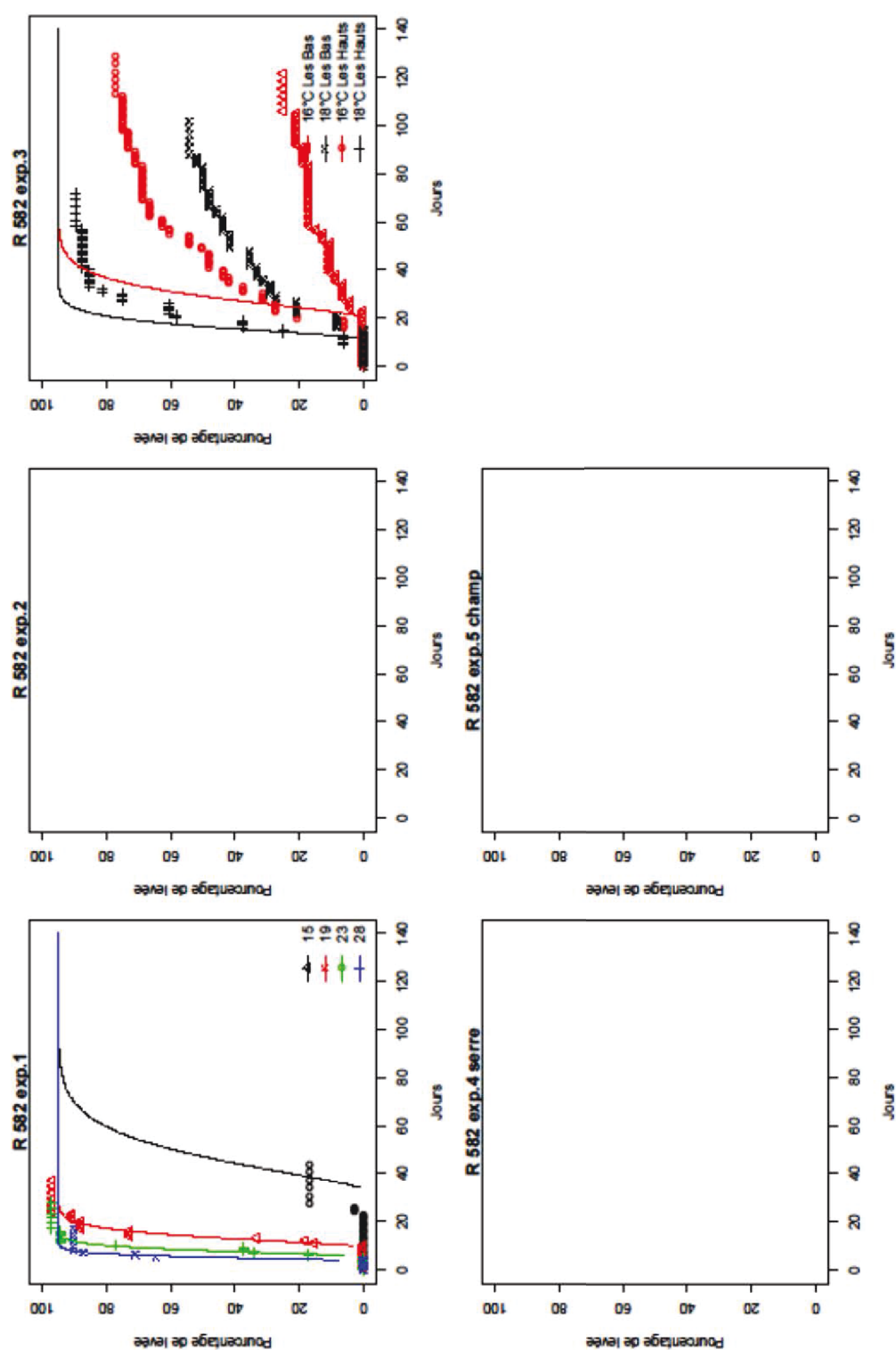
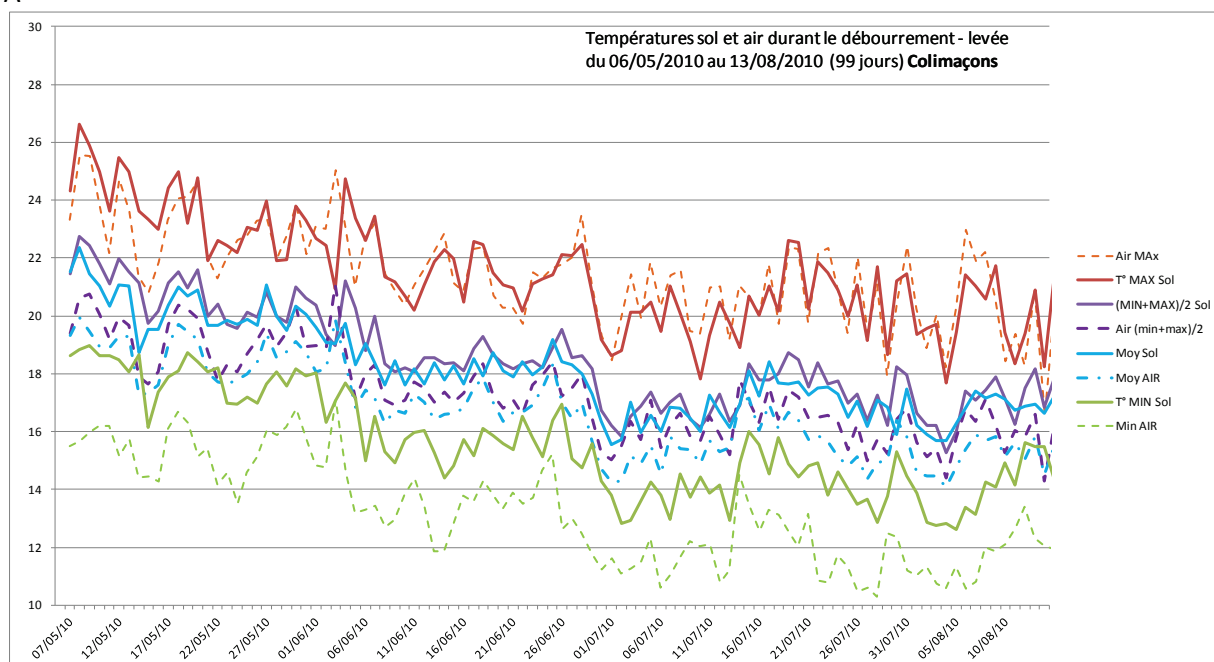


Figure 76. Taux de levées observées et prédites par essai pour la variété R92/804 qui devient R582.

2. Exp5. Températures de l'air et du sol.

A



B

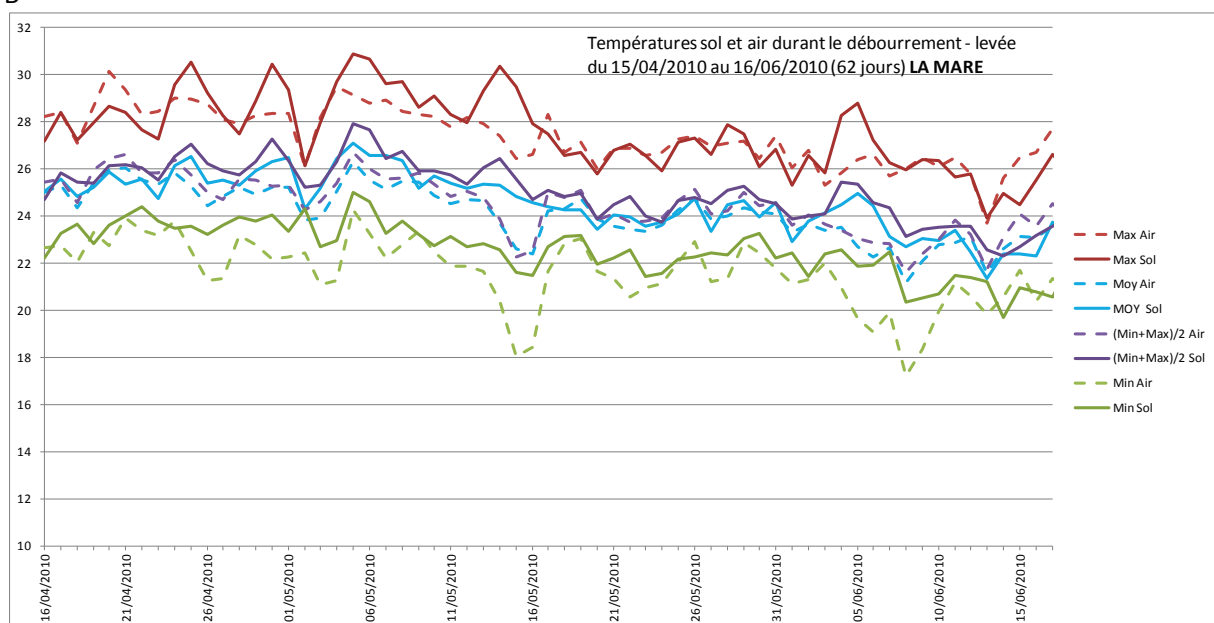
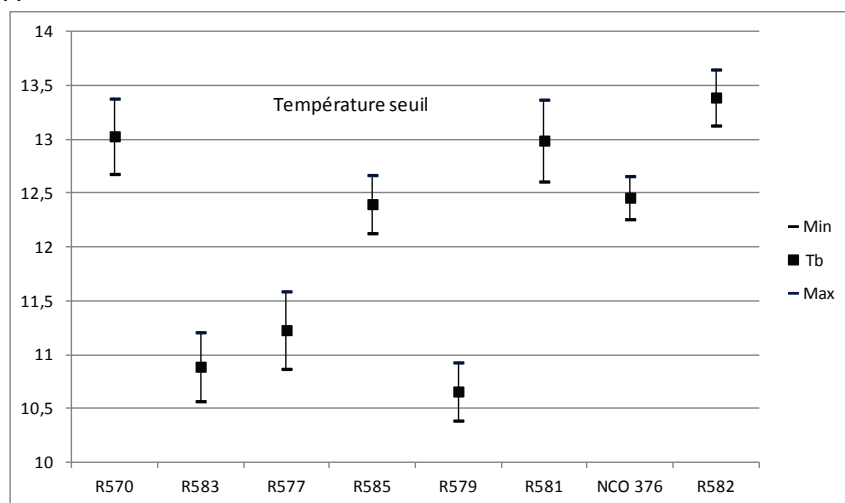


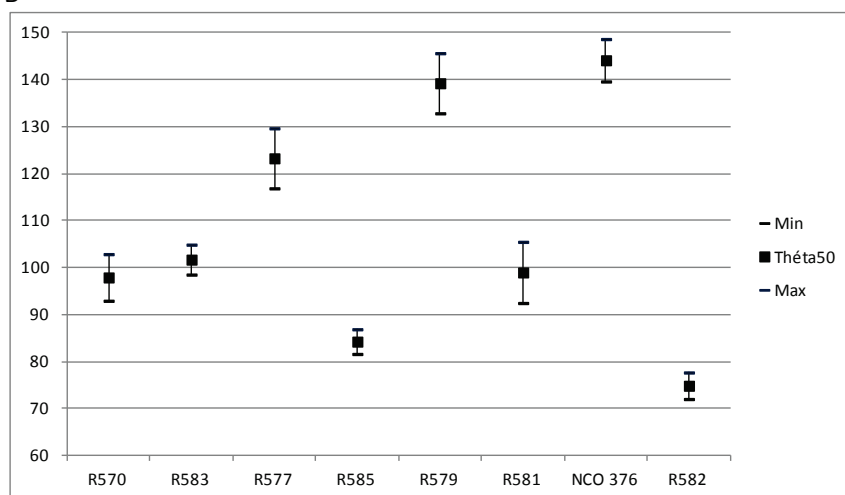
Figure 77. Moyenne; Moyennes agricole, minimum et maximum des températures journalières de l'air et du sol au champ (exp. 5) au cours du processus de débourrement-levée pour les deux sites selon les dates (en jour après plantation) A- Les Colimaçons : B- La Mare

3. Paramètres du modèle

A



B



C

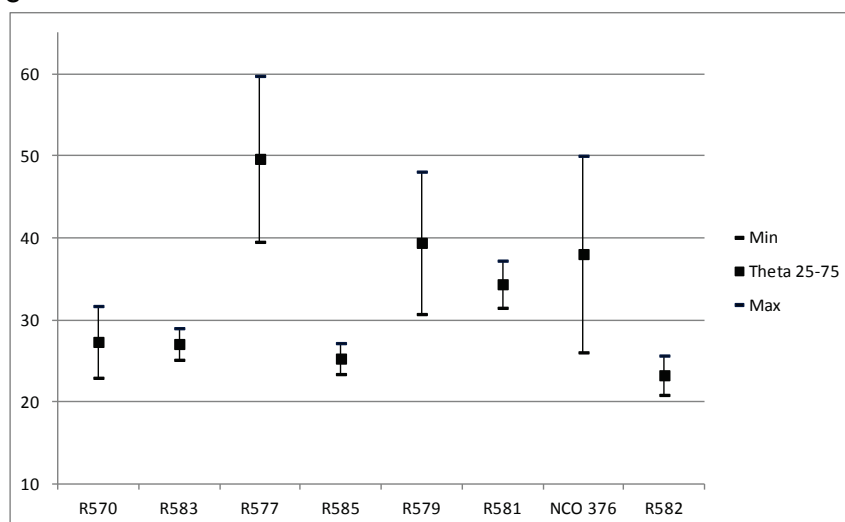


Figure 77. Comparaison entre A : Températures seuil (en °C), B : demi-levée (en degré.jour) et C : étalement entre variétés (en degré.jour) pour 8 variétés.